

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»
УДК 621.315.611

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ М. Я. Островерхов
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

на тему: «Вплив характеристик ізоляційних матеріалів на виникнення часткових розрядів в ізоляції високовольтного обладнання»

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕВ-81мп
Клименко Олександр Сергійович _____

Керівник:

Доцент кафедри теоретичної електротехніки,
к.т.н, Проценко Олександр Ростиславович _____

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,
Царьова Т. О. _____

Рецензент:

Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ініціали _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою
 Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 (спеціалізація «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Клименко Олександр Сергійовичу

1. Тема дисертації «Вплив характеристик ізоляційних матеріалів на виникнення часткових розрядів в ізоляції високовольтного обладнання», науковий керівник дисертації Проценко Олександр Ростиславович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «15» листопада 2019 р. №3923-с
2. Термін подання студентом дисертації 16.12.2019 р.
3. Об'єкт дослідження: ізоляційні матеріали: оргскло, скло, картон.
4. Перелік завдань, які потрібно розробити
 ЧР в ізоляції - причини, характеристики ЧР, зв'язок з пошкодженням ізоляції.
 Способи вимірювання - схеми, характеристики, способи калібрування.
 Нормативна література. Розробка експериментальної установки для вимірювання ЧР. Проведення експериментів на різних типах ізоляційних матеріалів. Обробка результатів та висновки
5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
 Презентація на тему магістерської дисертації.

6. Орієнтовний перелік публікацій

ВИЗНАЧЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ СТЕНДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ЗРАЗКАХ ІЗОЛЯЦІЇ МАЛОЇ ЄМНОСТІ

Проценко О.Р., к.т.н., доц., Троценко Є.О., к.т.н., доц., Клименко О.С., студент
 КІП ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	ЧР в ізоляції – причини, характеристики ЧР, зв'язок з пошкодженням ізоляції	15.10.2019 - 1.11.2019	
2	Способи вимірювання – схеми, характеристики, способи калібрування	1.11.2019 - 1.11.2019	
3	Розробка експериментальної установи для вимірювання ЧР	12.11.2019 - 25.11.2019	
4	Проведення випробування на різних видах ізоляції	25.11.2019 - 6.12.2019	

Студент

О.С. Клименко

Науковий керівник дисертації

О.Р. Проценко

Реферат

Структура дипломної роботи складається зі вступу, 5 розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 117 сторінки. Список використаних джерел містить 23 найменування.

Проблема виникнення та розвитку часткових розрядів у ізоляції обладнання високої і надвисокої напруги в умовах його експлуатації представляє великий інтерес як для персоналу, що експлуатує обладнання, також і для розробників обладнання, дослідників електроізоляції. ЧР створюють високе пошкодження ізоляції через її швидке руйнування в локальних місцях та подальше руйнування ізоляції в цілому.

Умови виникнення ЧР визначаються електрофізичними характеристиками матеріалів електричної ізоляції. ЧР зазвичай не призводять до пробою ізоляції, але призводять до локального руйнування діелектрика, що в подальшому може призвести до пробою. Проблема часткових розрядів в різних ізоляційних матеріалах є актуальною на сьогоднішній час. Кожен із видів ізоляційних матеріалів на надійну роботу енергетичного обладнання.

На сьогоднішній день не існує достовірних методів, що дозволяють передбачити залишковий ресурс ізоляції на основі вимірюваних характеристик часткових розрядів. Тому, незважаючи на успіхи в розвитку методів вимірювання і обробки ЧР, дослідження умов виникнення ЧР на конкретних зразках ізоляційних матеріалів.

Ключові слова: частковий розряд, ізоляція, перенапруга, частковий заряд, струм, високовольтне обладнання.

Abstract

The structure of the thesis consists of an introduction, 5 sections, conclusion, a list of used sources and applications. The total volume of work is 117 pages. Spectacular pocket pockets are 23 in total.

The problem of the occurrence and development of partial discharges in the isolation of high and high voltage equipment in the conditions of its operation is of great interest both for the personnel operating the equipment, as well as for the equipment developers, researchers of electrical insulation. CR causes high damage to the insulation due to its rapid destruction in local areas and subsequent destruction of the insulation as a whole.

The CR conditions are determined by the electrophysical characteristics of the electrical insulation materials. CRs usually do not lead to breakdown of insulation, but lead to local destruction of the dielectric, which can subsequently lead to breakdown. The problem of partial discharges in various insulating materials is relevant today. Each type of insulation material for reliable operation of power equipment.

To date, there are no reliable methods to predict the residual insulation life based on the measured characteristics of partial discharges. Therefore, despite the advances in the development of CR measurement and processing methods, the investigation of CR conditions on specific samples of insulating materials is investigated.

Keywords: private discharge, insulation, overvoltage, private charge, current, high-voltage equipment.

Зміст

Вступ.....	13
1. ЧР в ізоляції – причини, характеристики ЧР, зв'язок з пошкодженням ізоляції.....	15
1.1 Причини ЧР в ізоляції.....	15
1.2 Характеристики ЧР в ізоляції	18
1.3 Зв'язок ЧР з пошкодженням ізоляції в електрообладнанні	20
1.3.1 Особливості розвитку ЧР в ізоляції конденсаторів.....	20
1.3.2 Особливості розвитку ЧР в ізоляції кабелів.....	27
1.3.3 Особливості розвитку ЧР в силових трансформаторах	30
1.3.3 Особливості розвитку ЧР в ізоляції електричних машин.....	36
Висновки по розділу	40
2 Способи вимірювання – схеми, характеристики, способи калібрування.....	41
2.1 Схеми та методи вимірювання ЧР	41
2.2 Прилади для виміру характеристик ЧР	46
2.3 Калібрування ЧР.....	50
2.3.1. Калібрувальні генератори	53
Висновки до розділу	57
3. Розробка експериментальної установи для вимірювання ЧР.....	58
3.1 Розробка схеми установки та опис конструкції.....	58
3.2 Фільтри та їх класифікація	61
3.3 Розрахунок фільтру нижніх частот	69
Висновки до розділу	70
4 Проведення випробувань різних видів зразків ізоляції	71
4.1 Випробування зразка скла товщиною 1.2 мм.....	72
4.2 Випробування зразка скла товщиною 2.3 мм.....	74
4.3 Випробування зразка скла товщиною 5.6 мм.....	77
4.4 Випробування зразка картону товщиною 0.5 мм	80
4.5 Випробування зразка картону товщиною 1 мм	82
4.6 Випробування зразка картону товщиною 2 мм	85
4.7 Випробування зразка оргскла товщиною 5 мм.....	88
4.8 Аналіз результатів.....	86

Висновки до розділу	91
5. Стартап проект	93
5.1 Опис ідеї проекту	93
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	94
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску проекту	94
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	98
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	99
Висновки по розділу	101
Висновки	103
Список використаної літератури	105
Додатки.....	107
Додаток 1.....	107

Список умовних скорочень і позначень:

ЧР – частковий розряд

ЛЕП – лінія електропередавання

ВН – висока напруга

ЧЗ – частковий заряд

ТН – трансформатор напруги

ЕЛ – електрична ізоляція

ПР – поверхневий розряд

ВП – вимірювальний прилад

ВУ – випробувальна установка

ІХ – ізоляційна характеристика

УЗ – уявний заряд

НН – номінальна напруга

ПІ – паперова ізоляція

ІФ – індуктивність фільтру

КР – коронний розряд

ЦО – цифровий осцилограф

Вступ

Проблема виникнення та розвитку часткових розрядів у ізоляції обладнання високої і надвисокої напруги в умовах його експлуатації представляє великий інтерес як для персоналу, що експлуатує обладнання, також і для розробників обладнання, дослідників електроізоляції. ЧР створюють високе пошкодження ізоляції через її швидке руйнування в локальних місцях та подальше руйнування ізоляції в цілому.

На погіршення властивостей ізоляції в робочих умовах можуть суттєво впливати такі фактори, як вологість, перенапруга, температура, окислення, механічне пошкодження, динамічні навантаження тощо.

Умови виникнення ЧР визначаються електрофізичними характеристиками матеріалів електричної ізоляції. ЧР зазвичай не призводять до пробою ізоляції, але призводять до локального руйнування діелектрика, що в подальшому може призвести до пробою. Проблема часткових розрядів в різних ізоляційних матеріалах є актуальною на сьогоднішній час. Кожен із видів ізоляційних матеріалів на надійну роботу енергетичного обладнання.

Проблема часткових розрядів в різних ізоляційних матеріалів дуже актуально на сьогоднішній день. Кожен із видів ізоляційних матеріалів сильно впливає ізоляційну міцність, тобто захист від пробою дорогоцінного обладнання.

На сьогоднішній день не існує достовірних методів, що дозволяють передбачити залишковий ресурс ізоляції на основі вимірюваних характеристик часткових розрядів. Тому, незважаючи на успіхи в розвитку методів вимірювання і обробки ЧР, дослідження умов виникнення ЧР на конкретних зразках ізоляційних матеріалів.

Сучасна ринкова економіка призвела до того, що компанії, що займаються виробництвом, передачею та розподілом енергії, прагнуть будь-якими способами підвищити рентабельність виробництва, в тому числі зменшити витрати на експлуатацію парку обладнання. Результатом цього явища стало те, що капітальні вкладення у оновлення парку помітно скоротилися, а отже, виникла потреба у

забезпеченні максимально довгого строку експлуатації електричного обладнання шляхом контролю його стану, бажано в режимі онлайн.

Актуальність обраної теми На сьогоднішній день досі тривають розробки та способи підвищення електричної міцності ізоляційних матеріалів. Тема являє широкий спектр робіт для визначення впливу характеристик ізоляційних матеріалів на електричну міцність ізоляції високовольтного обладнання.

Отже, дослідження та розробка нових і вдосконалення існуючих методів та засобів вимірювання характеристик ізоляції є актуальним науково-технічним завданням, що повинне базуватись на наукове дослідження та результати практичної експлуатації енергетичного обладнання.

Стан наукової розробки. Питанням дослідження часткових розрядів присвячено ряд публікацій таких авторів, як. Кучинський Г.С., Багіров М.А., Баженова Т.Ю., Брагін С. М., Вдовико В.П., Русов В.А. та інші.

Метою дипломної роботи є проведення дослідження виникнення початкових ЧР для різних діелектричних матеріалів, зокрема, електротехнічного картону та скла.

Об'єктом дослідження ізоляційні матеріали: оргскло, скло, картон. Товщина об'єктів від 1 до 5,6 мм.

Предметом дослідження є встановлення залежностей виникнення початкових ЧР від типу матеріалу, його геометричних розмірів та конфігурації електричного поля.

Методи досліджень: моделювання виникнення ЧР на експериментальному стенді, вимірювання характеристик ЧР(уявний заряд), умов його виникнення та проведення аналітичних розрахунків.

Практичне значення отриманих результатів. Результати можуть бути використані для створення нових ізоляційних конструкцій з метою оптимізації їх масо-габаритних показників.

Структура дипломної роботи складається зі вступу, 5 розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 117 сторінок. Список використаних джерел має 23 найменування.

1. ЧР в ізоляції – причини, характеристики ЧР, зв'язок з пошкодженням ізоляції

1.1 Причини ЧР в ізоляції

Поняття часткового розряду в ізоляції охоплює місцевий розряд на поверхні або в середині ізоляції у вигляді корони, з поверхневим розрядом або пробоем окремих елементів ізоляції, шунтуюча частина ізоляції між електродами, що знаходяться під різними потенціалами[1].

ЧР в ізоляції виникають в місцях зі зниженою електричною міцністю (наприклад, в прошарках, де просочується рідина або в ізоляційних включеннях товщі діелектрика).

При розгляді ЧР еквівалентна схема діелектрика ємністю C_x може бути представлена трьома ємностями (рис. 1.1): C_a - ємністю елемента діелектрика, який бере участь в ч. р. (ємність включення); C_b , - ємністю елемента діелектрика, включеного послідовно з першим; C_d - ємністю діелектрика, позбавленої включень[1].

$$C_x = C_a + \frac{C_b C_d}{C_b + C_d}.$$

1.1

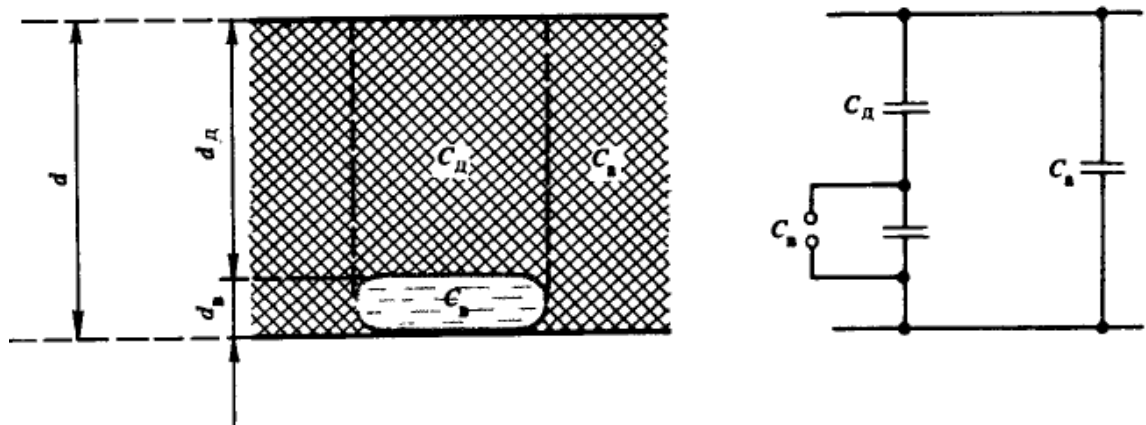


Рис.1.1 Еквівалентна схема виникнення ЧР в діелектрику[1]

Виникнення ЧР відбудеться тоді, коли напруженість на включенні досягне пробивного значення U_3 - напруги запалювання розряду у включенні.

Так, наприклад при включеннях на формі прошарку, витягнутої поперек силових ліній поля, напруженість у включенні E_v пов'язана з напруженістю в іншій частині діелектрика співвідношенням:

$$E_v/E_d = \epsilon_d/\epsilon_v \quad 1.2$$

де ϵ_v – діелектрична проникність включення,

ϵ_d – діелектрична проникність діелектрика.

У випадку газоподібних включень напруженість у включеннях перевищує напруженість в діелектрику.

Відношення між напруженістю у включенні та середньою напруженістю буде залежити від відношення товщини діелектрика і включення. Якщо d_d – товщина діелектрика (рис 1.1), d_v – товщина включення, U – напруга на електродах, то для схеми маємо:

$$E_v = \frac{UC_d}{d_v(C_d + C_v)} = \frac{U\epsilon_d/d_d}{d_v\left(\frac{\epsilon_d}{d_d} + \frac{\epsilon_v}{d_v}\right)} = \frac{U\epsilon_d}{\epsilon_v d_d + \epsilon_d d_v} \quad 1.3$$

Електрична міцність газу у включенні дуже мало відрізняється від міцності електричної міцності газу між металевими електродами. Якщо поле однорідне, то звідси слідує що пробивна напруга залежить від розмірами включення та тиском газу[17].

На рис.1.2 приведені залежності від пробивної напруги та тиску газу у включенні з певною товщиною. Із розмірами включення в десятки мікрометрів та тиском близьким до атмосферного, пробивна напруга є мінімальною у кривій Пашена, слабо змінюється при відхиленні включення і складаю 200-300 В[1].

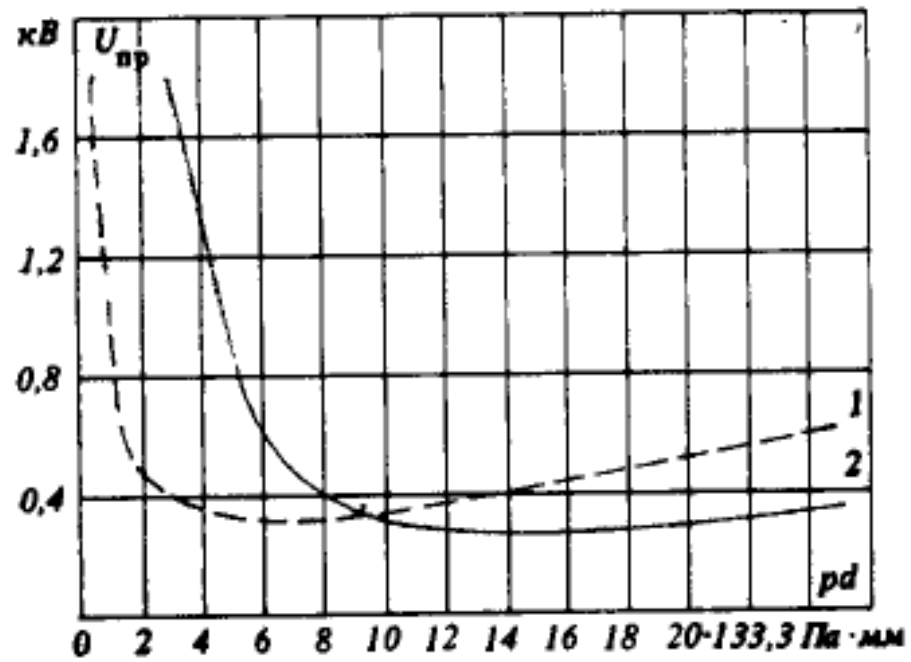


Рис 1.2. Пробивна напруга газів у залежності від тиску і відстані між електродами у рівномірному полі. 1- повітря. 2 – вуглекислий газ[1]

Пробивна напруга рідкого діелектрика різко збільшується із зменшенням товщини включення. Наприклад рис 1.3 приведена залежність напруженості масла від товщина зазору.

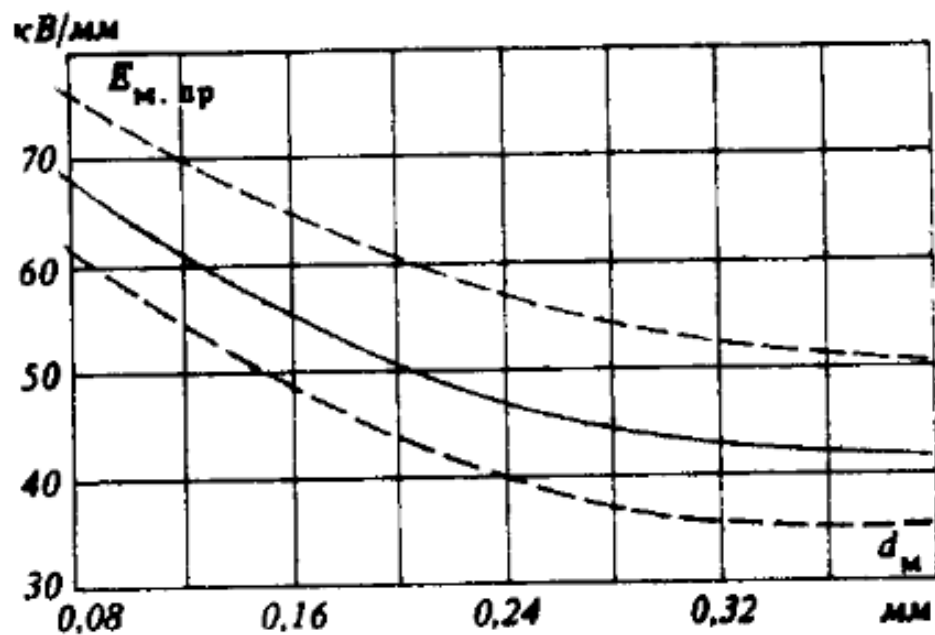


Рис. 1.3. Залежність пробивної напруги масляної прослойки від товщини для рівномірно поля[1]

При пробії ємності включення, іони заряджають поверхню включення і створюють поле, обернене до напрямку головному полю. Після розряду ємності C_v не відбувається велика густина струму, необхідна для підтримки самостійного розряду. Створення провідного слою може призвести до підтримки розряду. При пробії напруга не падає до нуля, а до визначеного значення $U_{вп.}$, при якому розряд гасне. Ця напруга менше пробивної напруги і може бути у межах $0,1-0,9U_v$. [7]

Напруга на електродах об'єкта, що сприяє виникненню ЧР має назву напругою часткових розрядів $U_{ч.р}$. Зв'язок між ними може бути встановлений із рис.1.1:

$$U_{ч.р} = U_{в.з} \frac{C_d + C_v}{C_d} \quad 1.4$$

Довжина процесу пробою складає $3нс$. Лише при потужних часткових розрядах, пробії більше $1см$ час може розтягнутись до $0.1нс$.

1.2 Характеристики ЧР в ізоляції

Кожен із ЧР супроводжується проходженням заряду і приводить до зміни напруги на зовнішніх електродах. Визначити заряд можливо так:

$$q = (C_v + C_d) (U_{в.з} - U_{в.п}) = (C_v + C_d) \Delta U_v \quad 1.5$$

Практично заряд не може бути вимірний, так як його прохід зв'язаний із процесом внутрішньої частини діелектрика.

В момент виникнення ЧР можна вважати, що заряд на електродах не змінюється, так як ємність об'єкта віддалена від іншої ємності схеми індуктивністю з'єднувальних проводів. Зміна напруги відбувається за рахунок збільшення ємності об'єкту при виникненні ЧР (шунтування ємності C_v рис 1.1.). [9]

$$q_{ч.р} = \Delta U_x C_x = \Delta U_v C_d = q \frac{C_d}{C_d + C_v} \quad 1.6$$

Якщо включення мають форму прослойки, витягнутої поперек силових ліній поля, то зручно буде C_d і C_b віднести до єдиної поверхні включення. Інший вид формули 1.6 виходячи з цього:

$$q_{ч.р} = q \frac{\frac{\epsilon_d}{d - d_b}}{\frac{\epsilon_d}{d - d_b} + \frac{\epsilon_b}{d_b}} = \frac{q}{1 + \frac{\epsilon_b}{\epsilon_d} \left(\frac{d}{d_b} - 1 \right)}$$

1.7

Звідси слідує що при тому ж заряді і незмінній товщині включення заряд ЧР зменшується від товщини включення.

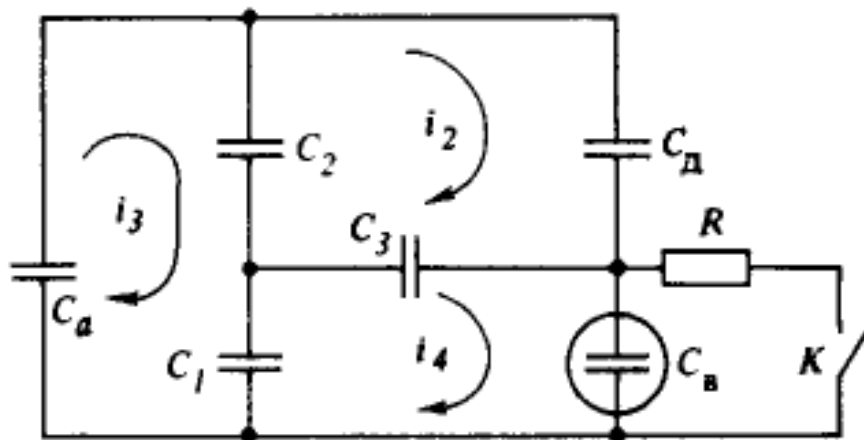


Рис 1.4 Спрощена схема при місцезнаходження включення біля електроду

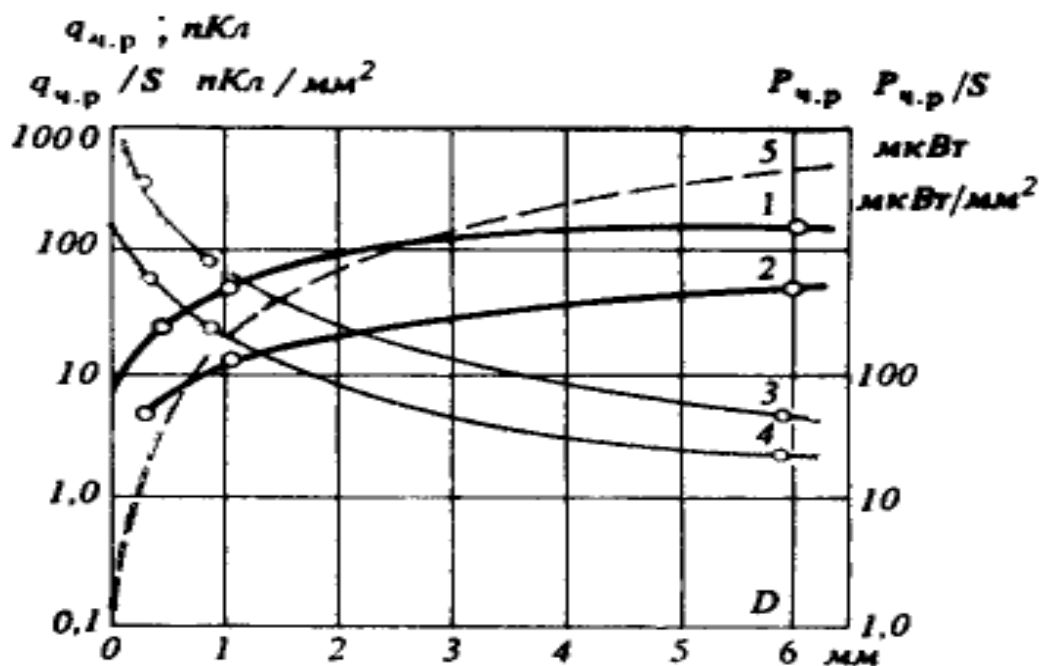


Рис. 1.5 Залежність характеристики ЧР по схемі рис.1.4[1]

Рисунок показує, що за малим діаметром виділяється енергія 10-100 раз більша ніж, яка вивільняється за рахунок деполяризації зарядів, накопичених на протилежних стінках. Збільшення енерговиділення та сили ЧР являється одною із причин низької довжини електричної міцності діелектрика, витягнутим в напрямку силових ліній.

1.3 Зв'язок ЧР з пошкодженням ізоляції в електрообладнанні

1.3.1 Особливості розвитку ЧР в ізоляції конденсаторів

В якості діелектрика секцій у силових конденсаторах застосовується паперова, плівково-паперова або ще плівкова ізоляція, яка просочена рідким діелектриком.

В ізоляції секції конденсатора можна виділити дві області. Перша область неоднорідність полів, яка створюється на краях і зберігається від краю обкладинки на порядок більше на товщу діелектрика. Друга область – плоско паралельні поля, що мають місце під обкладинками на великих відстанях від краю, де напруженість в кожному із слоїв залишається рівномірною. Напруженість ЧР рахується середньою напругою електричного поля:

$$E_{\text{ч. р}} = U_{\text{ч. р}} / d_{\text{с}} \quad 1.8$$

де $U_{\text{чр}}$ - напруга прикладена на секції конденсатора,

$d_{\text{с}}$ - товщина секції діелектрика.

Оскільки ізоляція секції складає із ряду слоїв діелектрика, то при електричних характеристиках розглянемо еквівалентну схему, що на рис.1.6., де прошарок паперової та плівкової ізоляції під'єднані послідовно.

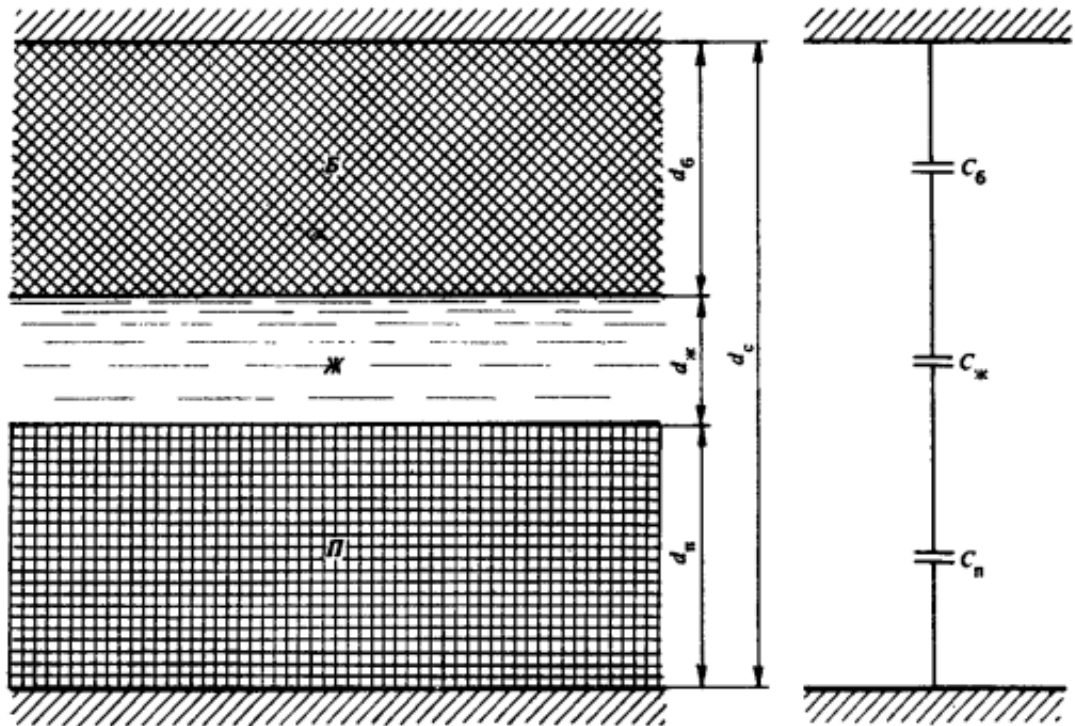


Рис.1.6 Еквівалентна схема паперово-плівкового просоченого діелектрика
Б – папір, Ж – рідкий діелектрика, П – плівка.

Виходячи із рис 1.6. для напруженості електричного поля в різних видах діелектриків справедливі формули:

$$E_б = \frac{U}{\epsilon_б \left(\frac{d_б}{\epsilon_б} + \frac{d_п}{\epsilon_п} + \frac{d_ж}{\epsilon_ж} \right)} = \frac{E'_{ср}}{\epsilon_б \left(\frac{a_б}{\epsilon_б} + \frac{a_п}{\epsilon_п} + \frac{a_ж}{\epsilon_ж} \right)} \quad 1.9$$

$$E_п = \frac{U}{\epsilon_п \left(\frac{d_б}{\epsilon_б} + \frac{d_п}{\epsilon_п} + \frac{d_ж}{\epsilon_ж} \right)} = \frac{E'_{ср}}{\epsilon_п \left(\frac{a_б}{\epsilon_б} + \frac{a_п}{\epsilon_п} + \frac{a_ж}{\epsilon_ж} \right)} \quad 1.10$$

$$E_ж = \frac{U}{\epsilon_ж \left(\frac{d_б}{\epsilon_б} + \frac{d_п}{\epsilon_п} + \frac{d_ж}{\epsilon_ж} \right)} = \frac{E'_{ср}}{\epsilon_ж \left(\frac{a_б}{\epsilon_б} + \frac{a_п}{\epsilon_п} + \frac{a_ж}{\epsilon_ж} \right)} \quad 1.11$$

d – відповідно товщина діелектрика,

ε – відповідно діелектрична проникність.

Напруженість в різних прошарках діелектрика може сильно змінюватись. При використанні неполярних діелектриків найбільша напруженість виникає в прошарці рідкого діелектрика. Також інтенсивна напруженість виникає і у плівковому діелектрику. При використанні полярних просочених діелектриків із діелектричною проникністю в 5-6, то напруженість мало відрізняється від напруженості в картоні[18].

В конденсаторній ізоляції ЧР при змінній напрузі виникають наперед на краю електрода, де є більша напруженість електричного поля.

Залежність струму і потужності початкових ЧР:

$$I_{\text{н}} = q_{\text{н}} n_{\text{н}0} \left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^{a_1} = I_{\text{н}0} \left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^{a_1} \quad 1.12$$

$$P_{\text{н}} \approx I_{\text{н}} U = P_{\text{н}0} \left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^{a_1+1} = P_{\text{н}0} \left(\frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^a \quad 1.13$$

де $I_{\text{н}0}$, $P_{\text{н}0}$, $n_{\text{н}0}$ – значення відповідних характеристик при напрузі ЧР[1].

Залежність величин представлених у формулах 1.12 та 1.13 на рис.1.7. Характер залежності інтенсивності ЧР від напруженості не міняється при зміні товщини діелектрика і температури.

Експериментально було встановлено для паперово-масляної ізоляції:

$$I_{\text{н}} = q_{\text{н}} n_{\text{ч. п}} = A_1 U^{a_1} \quad 1.14$$

$$P_{\text{н}} = q_{\text{н}} n_{\text{ч. п}} U = I_{\text{н}} U = A_2 U^a = A_3 E^a \quad 1.15$$

де $a = a_1 + 1$ становить від 5 до 8, у середньому 6.

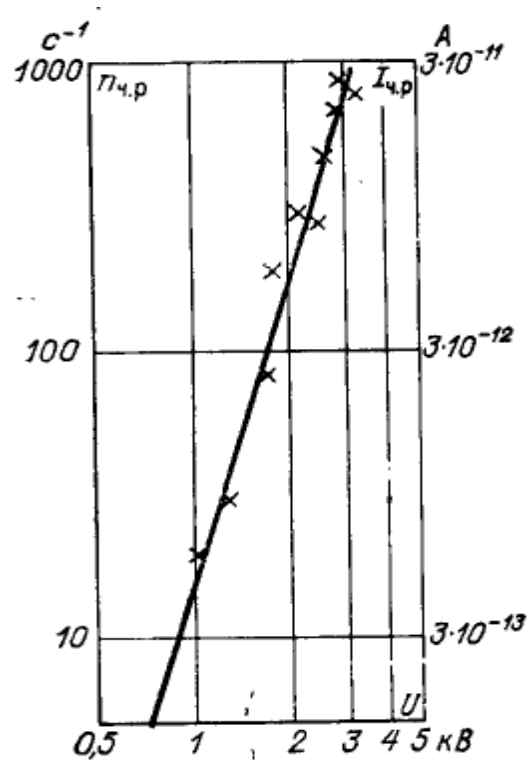


Рис.1.7. Залежність струму ЧР від напруги, паперово-масляної ізоляції при товщині 80мкм[1].

Максимальна розчинність газів в одному із широко відомих рідких діелектриків – мінеральному маслі, наведена на рис.1.8.

Газ	Содержание газа в масле	Газ	Содержание газа в масле
Воздух	10,3	Окись углерода (CO)	9
Азот (как часть воздуха)	6,98	Метан (CH ₄)	30
Кислород (как часть воздуха)	3,03	Углекислый газ (CO ₂)	120
Азот (N ₂)	8,6	Этан (C ₂ H ₆)	280
Кислород (O ₂)	15,9	Этилен (C ₂ H ₄)	280
Водород (H ₂)	7	Ацетилен (C ₂ H ₂)	400
Аргон (Ar)	15	Пропилен (C ₃ H ₆)	1200
		Пропан (C ₃ H ₈)	1900

Рис. 1.8. Розчинність газу у мінеральному маслі, при 20⁰ С і 98кПа[5].

Розчинність газів у маслі пропорційна зовнішньому тиску в діапазоні температур 20 до 100 градусів є лінійною функцією температури. На розчинність впливає в'язкість масла: для масла із низькою в'язкістю вона більше, а для масла з високою – менше.

Характерна залежність часу зниження напруженості ЧР до мінімального значення від величини приложеної напруги за формулою 1.16 при $U_{кр}=2U_n$ показана на рис.1.9.[1]

$$\tau = \frac{\beta H_0 - h_{ч.р}}{\beta h_{ч.р}} \quad 1.16$$

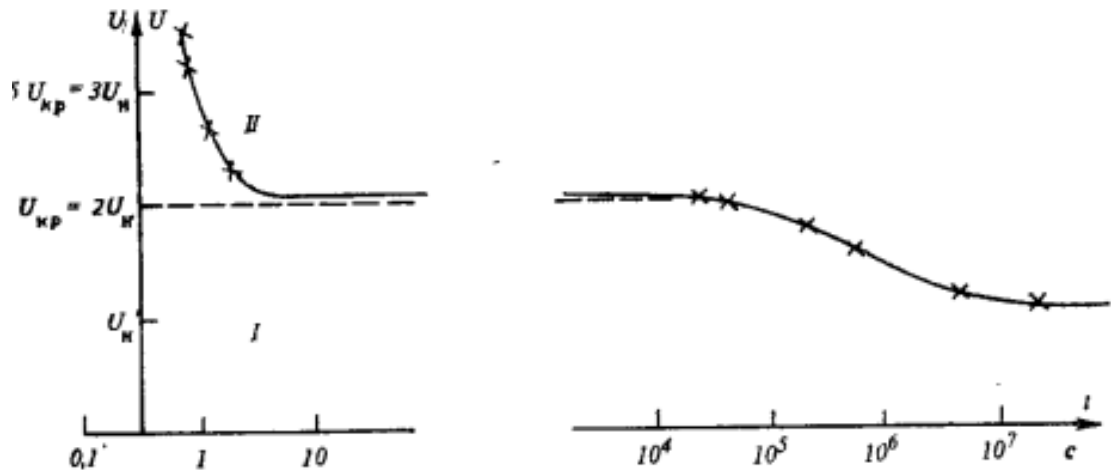


Рис. 1.9 Залежність часу зниження напруженості критичних розрядів до мінімальних значень приложеної напруги $U_{кр}=2U_n$, I – область початкових часткових розрядів, II – область критичних часткових розрядів.

Якщо після зниження напруги, критичні ЧР в процесі подальшої роботи не мають місця, або ізоляція не знаходиться під напругою, то створені газові включення розчиняються в рідкому діелектрику і напруга ЧР може збільшуватись.

Такі закономірності протікання ЧР відносяться до паперово-масляної ізоляції. При промочуванні паперово- конденсаторного діелектрика хлордифенілами характер розвитку та протікання процесі має деякі специфічні особливості. Хлордефіли при розчиненні під дією ЧР не виділяють такої кількості газів, як при нафтовому маслі.

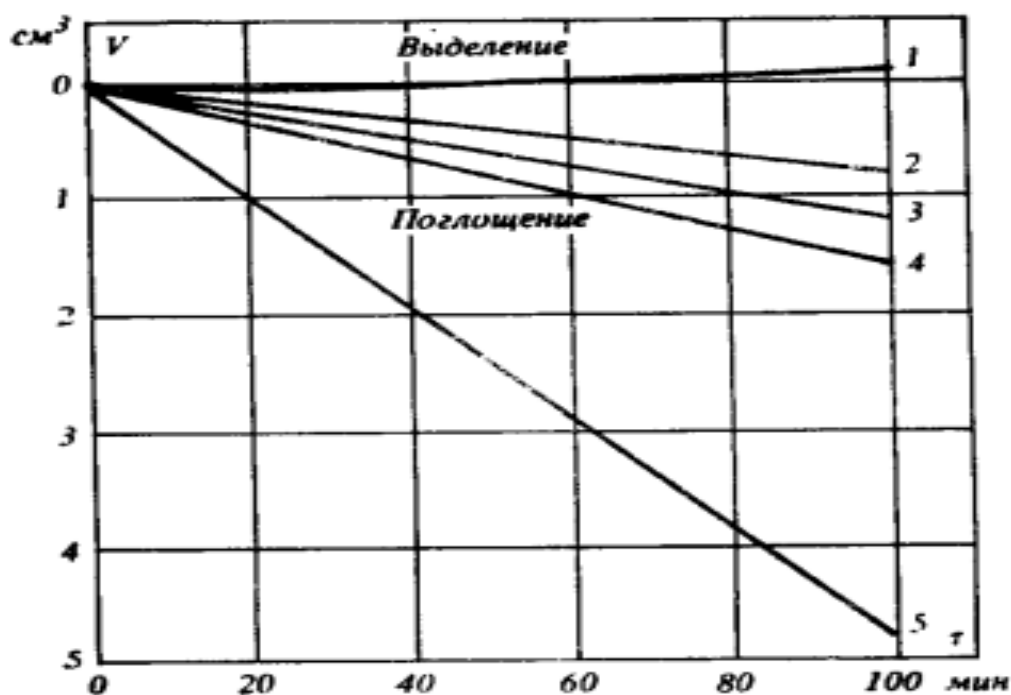


Рис.1.10 Газостійкість різних рідких діелектриків при випробуванні у середовищі 40 градусів. 1 – нафтове масло, 2 – газостійке конденсаторне масло, 3 – нафтове конденсаторне масло для північних районів, 4 - нафтове конденсаторне масло для помірного клімату, 5 – трихлордефейл.

Характерні залежності газовиділення під дією розрядів у різних рідких діелектриках на рис.1.10. Газовиділення для хлордефінілів зв'язано з тим що, рідкі діелектрики є ароматичними вуглеводними з єднаннями, в основі яких лежить бензольне кільце. Вони можуть гідруватись, вступати в взаємодію з активними радикалами, забирати вуглекислий газ і другі продукти[19].

Завдяки меншому газовиділенню чи навіть відсутності, напруга ЧР змінюються слабо або не зміняється взагалі.

Однак під дією ЧР у хлордефінілів є інші зміни: виділяється сажа, що спричиняє руйнування твердого діелектрика.

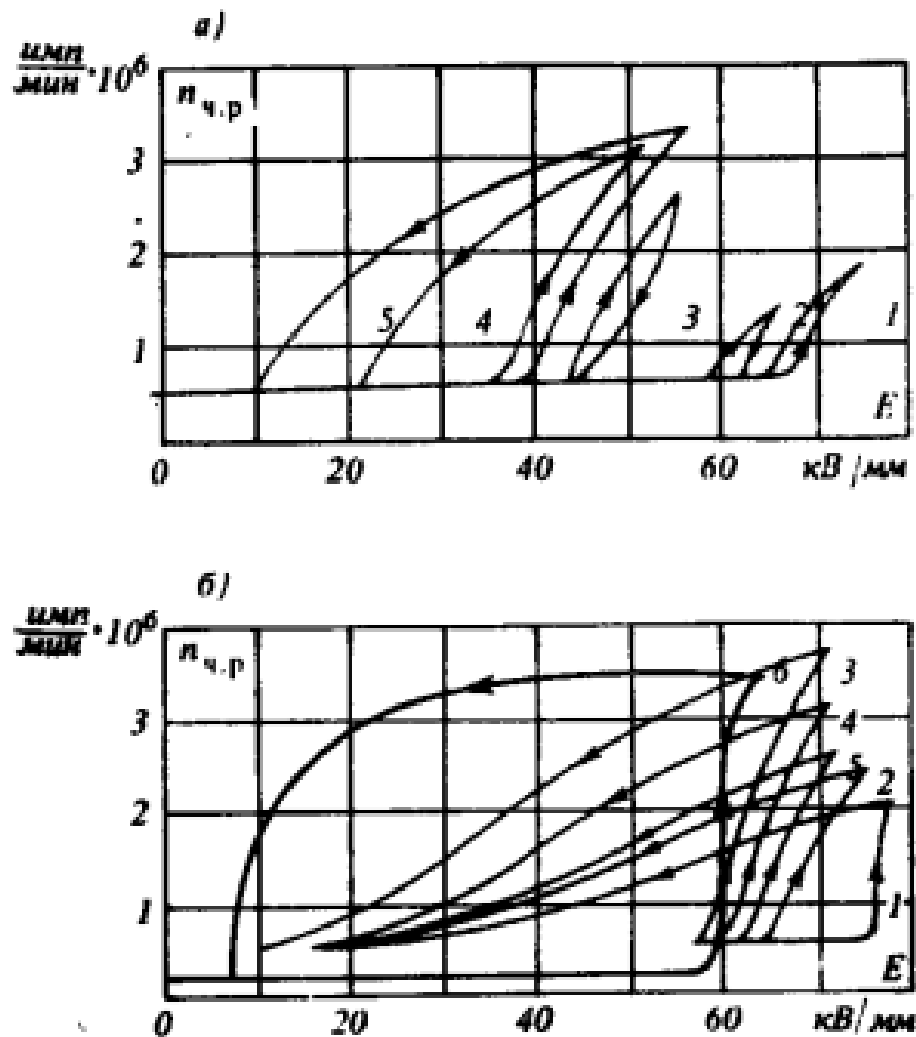


Рис. 1.11. Залежність інтенсивності критичних розрядів від напруженості електричного поля при підйомі та зниженні напруги. а – паперові конденсатори з просоченням трихлордифенілом, б – паперові з просоченням МГТ-45. 1- $t=80^{\circ}\text{C}$, 2 – $t=50^{\circ}\text{C}$, 3 – $t=20^{\circ}\text{C}$, 4 – $t=0^{\circ}\text{C}$, 5 – $t=20^{\circ}\text{C}$ [1]

Як видно із цих малюнків, із підвищенням температури затухання ЧР становить при меншому зниженні напруженості, тобто швидше. Підвищення напруги до значення виникнення ЧР не проводить до зниження напруженості ЧР. Конденсатори просочені трихлордифенілом, працюють без поломок більше 1000 годин при напруженості критичних часткових розрядів тоді як конденсатори із просоченням масла в такому ж режимі працюють 1- 6 годин.

1.3.2 Особливості розвитку ЧР в ізоляції кабелів

Для кабелів високої напруги набрала популярності ізоляція на основі кабельного паперу з просочуванням масло каніфольним компаундом або нафтовими кабельними маслами. В деяких типах ізоляція використовується із пластмас. [1]

Паперова ізоляція виконується із стрічки кабельного паперу, що накладається одна на одну із про шарком між стрічками одного про шарку. Перекриття складає 30 -35% від кроку намотки. Ширина про шарку складає приблизно 0,5 – 2 мм рис 1.12.

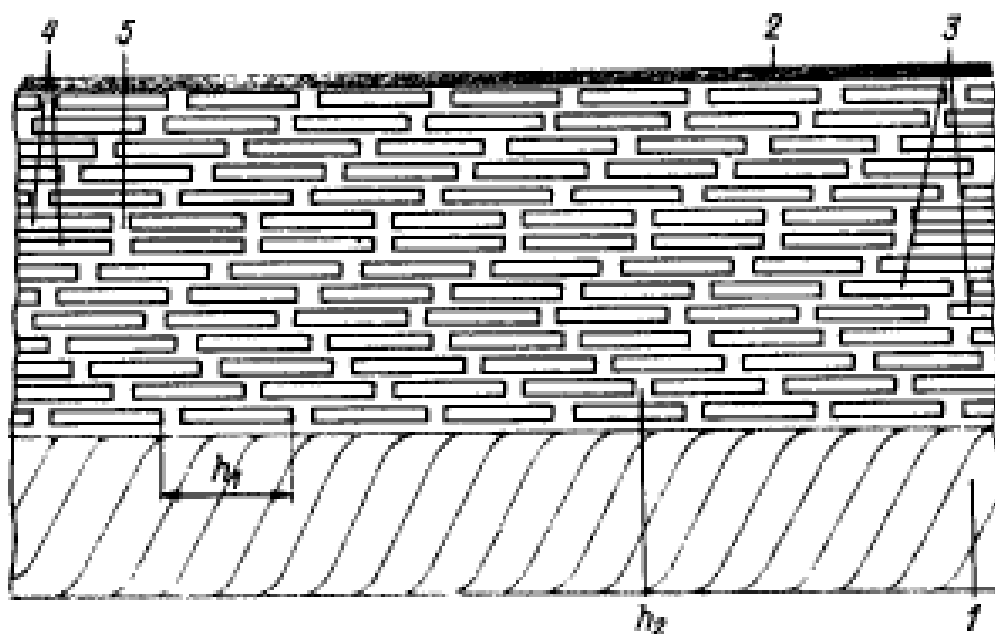


Рис.1.12. Структура ізоляції кабелів з паперовою ізоляцією. 1- струмова жила, 2 – свинцева оболонка, 3 – стрічки паперу, 4 – можливий дефект, 5 – збільшений масляний про шарок, h_1 - крок намотки, h_2 - ширина масляного каналу[1]

Так як паперова ізоляція кабелю сушиться та просочується під вакуумом, то зазори заповнені кабельним маслом або просоченим складом (компаундом). Товщина про шарку разом із зазором при ідеальній густині намотки не може бути менше подвійної товщини стрічки.

В кабелях із в'язким просоченням можливо створення газових включень в товщині ізоляції як в процесі виробництва кабелю, так і при експлуатації його.

При ідеальних умовах сушки, просочування та охолодження, об'єм газових включень складає 0,1-0,3%. Після того як кабель пропрацює деякий час відсоток збільшиться до 3%.

Створення газових включень в процесі експлуатації кабелю є причина, повторних нагрівів та охолоджень кабелю. При нагріві найбільше розширяється просочуваний склад. Це призводить до збільшення тиску у кабелі, та розширенням свинцевої оболонки. Після охолодження об'єм просочуваного матеріалу спадає, а деформація залишається. З цього і створюються газові включення які заповнюють деформований простір[20].

В ізоляції одножильного кабелю напруженість буде розрахована:

$$E_r = \frac{U}{r \ln(r_2/r_1)} \quad 1.17$$

де U – напруга між жилою та оболонкою кабелю,

r_2, r_1 – радіуси оболонки.

Найбільша напруженість виникає на поверхні жили:

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln(r_2/r_1)} \quad 1.18$$

В кабелях із жилою, що складається із окремих проволок, напруженість на поверхні жили збільшується.

Для зменшення впливу з просоченою жилою паперової ізоляції, послідовно розкладають прошарок паперу та просоченої рідини. При цьому в окремих прошарках при включенні змінної напруги виникає різні напруженості електричного поля, що спричиняє різні діелектричні проникності прошарків.

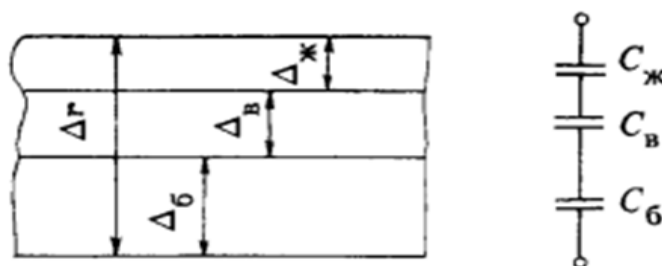


Рис. 1.13. Еквівалентна схема елементарного прошарку із просоченою паперовою ізоляцією[1]

Еквівалентна ємність C елементарного прошарку на одиницю довжини, можна визначити ємністю трьох послідовного з'єднаних конденсаторів:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \frac{1}{C_{\delta}} + \frac{1}{C_{\text{в}}} + \frac{1}{C_{\text{ж}}} = \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{\Delta_{\delta}}{\epsilon_{\delta}} + \frac{\Delta_{\text{в}}}{\epsilon_{\text{в}}} + \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\epsilon_{\text{ж}}} \right) \quad 1.19$$

Визначимо напругу за допомогою еквівалентного заміщення:

$$\Delta U_{\text{в}} = \Delta U \frac{C_{\Sigma}}{C_{\text{в}}} = - \frac{E_r \Delta r \Delta_{\text{в}} / \epsilon_{\text{в}}}{\frac{\Delta_{\delta}}{\epsilon_{\delta}} + \frac{\Delta_{\text{в}}}{\epsilon_{\text{в}}} + \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\epsilon_{\text{ж}}}} \quad 1.20$$

Якщо взяти до уваги, що $\Delta r = \Delta_{\delta} + \Delta_{\text{в}} + \Delta_{\text{ж}}$, відношення напруженості до середньої напруженості:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_r} = \frac{1 + \frac{\Delta_{\text{ж}} + \Delta_{\delta}}{\Delta_{\text{в}}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{в}} \epsilon_{\delta} \Delta_{\text{ж}} + \epsilon_{\text{в}} \epsilon_{\text{ж}} \Delta_{\delta}}{\epsilon_{\delta} \epsilon_{\text{ж}} \Delta_{\text{в}}}} = \frac{1 + \frac{\Delta_{\text{ж}} + \Delta_{\delta}}{\Delta_{\text{в}}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{в}}}{\epsilon_{\delta}} \frac{\Delta_{\delta}}{\Delta_{\text{в}}} + \frac{\epsilon_{\text{в}}}{\epsilon_{\text{ж}}} \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\Delta_{\text{в}}}} \quad 1.21$$

Для напруженості в прошарку просоченого складу:

$$\frac{E_{\text{ж}}}{E_r} = \frac{1 + \frac{\Delta_{\text{в}} + \Delta_{\delta}}{\Delta_{\text{ж}}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{ж}} \epsilon_{\delta} \Delta_{\text{в}} + \epsilon_{\text{в}} \epsilon_{\text{ж}} \Delta_{\delta}}{\epsilon_{\delta} \epsilon_{\text{в}} \Delta_{\text{ж}}}} = \frac{1 + \frac{\Delta_{\text{в}} + \Delta_{\delta}}{\Delta_{\text{ж}}}}{1 + \frac{\epsilon_{\text{ж}}}{\epsilon_{\text{в}}} \frac{\Delta_{\text{в}}}{\Delta_{\text{ж}}} + \frac{\epsilon_{\text{ж}}}{\epsilon_{\delta}} \frac{\Delta_{\delta}}{\Delta_{\text{ж}}}} \quad 1.22$$

Просочений склад або газ може знаходитись головним типом в зазорах між стрічками паперу. При цьому товщину зазорів між стрічками кабельного паперу приблизно буде рівна паперовій стрічці.

Якщо всі зазори заповнені просоченим складом, то:

$$\frac{E_{\text{ж}}}{E_r} = \frac{1 + n}{1 + n \epsilon_{\text{ж}} / \epsilon_{\delta}} \quad 1.23$$

Якщо всі зазори заповнені газом, то:

$$\frac{E_B}{E_r} = \frac{1 + n}{1 + n \epsilon_B / \epsilon_0} \quad 1.24$$

Якщо всі зазори заповнені просоченим складом і деякі газом, то:

$$\frac{E_B}{E_r} = \frac{1 + n}{\frac{\epsilon_B}{\epsilon_{жк}} + \frac{n \epsilon_B}{\epsilon_0}} \quad \text{и} \quad \frac{E_{жк}}{E_r} = \frac{1 + n}{1 + \frac{n \epsilon_{жк}}{\epsilon_0}} \quad 1.25$$

Таким чином, напруженість електричного поля в прошарках просоченого складу і в можливих газових включень, перевищує середню напруженість.

Так як електрична міцність просоченого складу, суттєво менше міцності просоченого паперу.

1.3.3 Особливості розвитку ЧР в силових трансформаторах

У силових трансформаторах застосовується, маслобар'єрна ізоляція, яка складається із електрокартону і нафтового масла. З двох компонентів при дії змінного і імпульсної напруги найбільш навантажені масляні канали.

Так як електрична міцність масла в 3 -4 раз менше за електрокартон, то ЧР створюються в прошарках масла.

В силових трансформаторах місцеві підвищення напруги, достатні для виникнення ЧР. Небезпека, звичайно, залежить від місця їх виникнення.

Можна виділити типи ЧР у трансформаторів:

1. Пробій масляного каналу в маслобар'єрній ізоляції середньої частини обмотки.
2. Пробій ізоляції в кряях обмотки.
3. Пробій масляного зазору в місці зіткнення ізольованого проводу і електрокартону або паперу .
4. ЧР в паперово-масляній ізоляції на відводах.
5. Пробій масляного каналу між котушками.
6. Частковий пробій виткової ізоляції
7. Ковзкий розряд по електрокартону.

$$E_m = \frac{U}{r_{\text{ср}} \varepsilon_m \sum_i \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}},$$

1.26

$r_{\text{ср}}$ - Радіус поверхні,

r_i Радіус граничної поверхні,

ε_i - Діелектрична проникність прошарку.

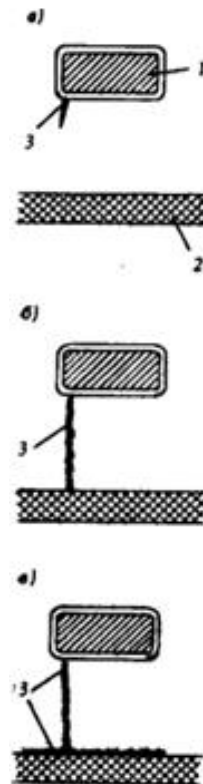


Рис. 1.14. Схема розвитку пробую масляного каналу. 1 – обмотка, 2 – бар'єр, 3 – розряд[1].

Такий пробій зазвичай проходить через локальним необоротним пошкодженням твердої ізоляції. Для ізоляції трансформатора важливо зберегти ізоляційні властивості в момент пробую масляного каналу.

В головній ізоляції СТ висока напруженість виникає на поверхні проводу обмотки $E_{\text{макс}}=2-2,5E_m$. E_m – напруженість в середині масляного каналу, визначається за формулою 1.26.

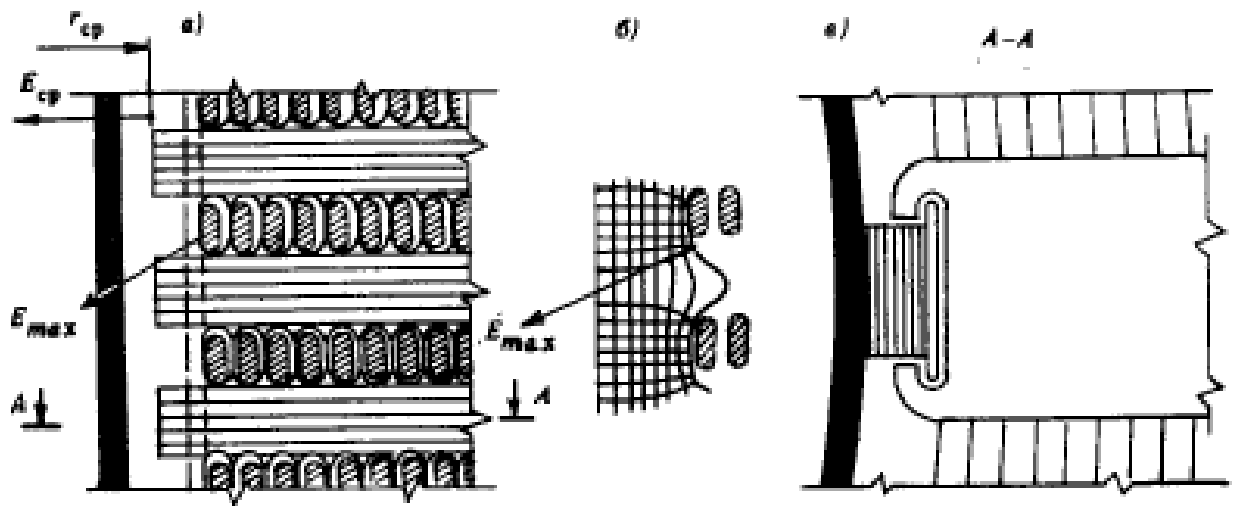


Рис. 1.15. Ескіз виконання ізоляції у внутрішній поверхні обмотки (а), картина електричного поля в маячному каналі поблизу обмотки(б)[1].

Характерними особливостями умов роботи маслобар'єрної ізоляції в трансформаторах є те що, немає відкритих металевих поверхонь електродів у місцях найбільшої напруженості поля та відсутні гострих кутів на електродах. Початкові ЧР локалізуються на поверхні ізоляції. Друге, ЧР появляються у місцях зіткнення бар'єрів і ізолюваного проводу обмотки переходів та перемичок. На рис. 1.15. показано виконання ізоляції та поля у вузлі[12].

Значну небезпеку при довгій дії робочої напруги, ЧР що виникають на поверхні ізоляції проводу у проміжках між проводом та прокладками.

Створення шарів в маслі можливо різкому зменшенню тиску, тобто розложення масла в електричному полі в результаті зміни температури. Вони є малого розміру, але при їх кількості вони створюють приємні умови для створення часткових розрядів[12].

Збільшення напруженості електричного поля створюються на краю обмотки біля ємнісного кільця рис.1.16.

В трансформаторах високих класів для зменшення максимальної напруженості поля поверхні ємнісних кільце виконуються радіусом в 40 – 50мм.

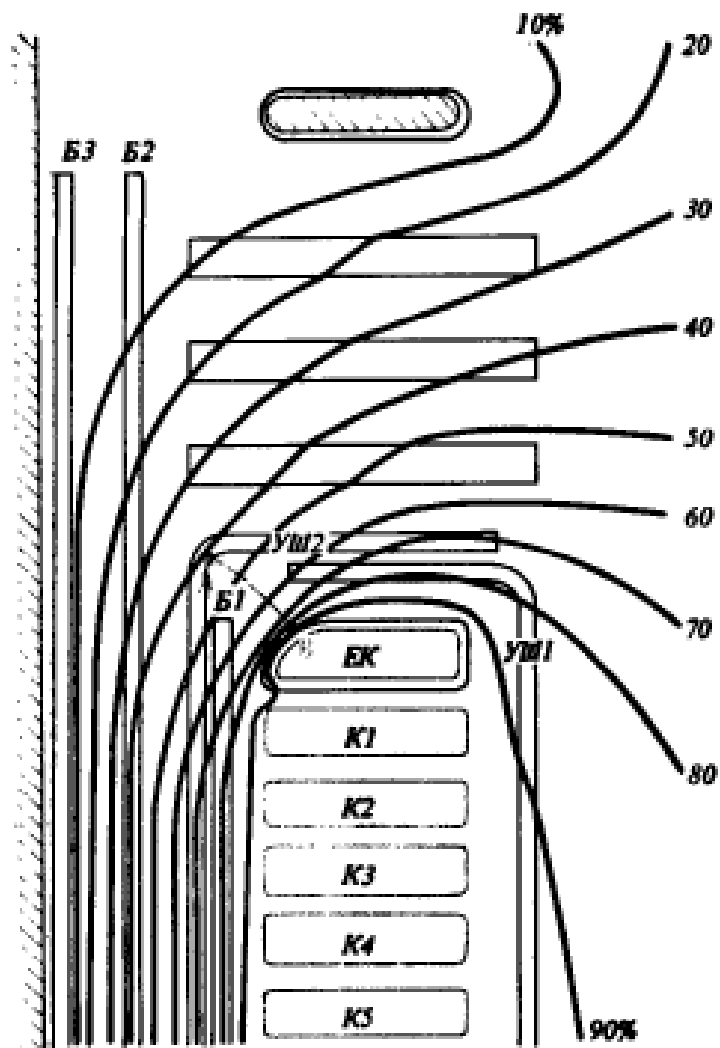


Рис.1.16. Характерна картина поля для краю обмотки[1]

Оцінка $E_{\text{макс}}$ може бути зроблена на основі розрахунку поля між електродами круглої форми кут – площина:

$$E_{\text{макс}} = E_{\text{ср}} \sqrt[3]{\frac{d+r}{r}},$$

1.27

де $E_{\text{ср}}=U/d$ та r – радіус закруглення кута.

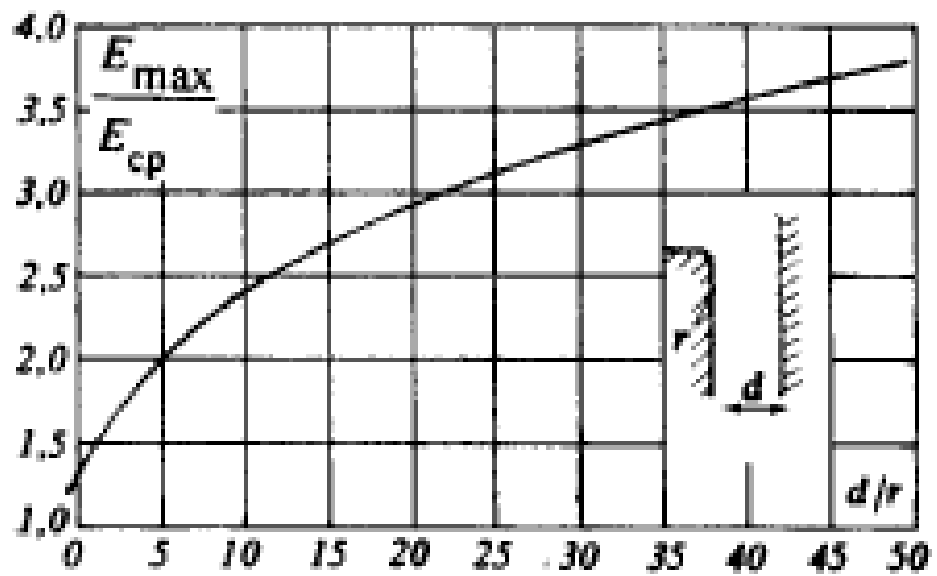


Рис.1.17. Залежність максимального кута в системи кут – площа від відношення d/r [14]

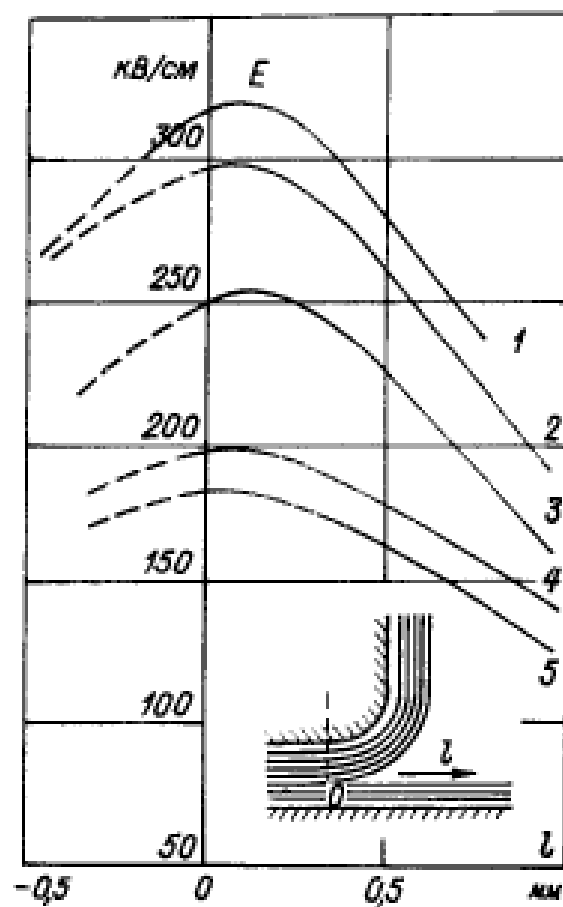


Рис. 1.18. Розподілення напруженості по поверхні картону в залежності від l при роз'єднанні ізоляційних батарей для різних відстаней [4]

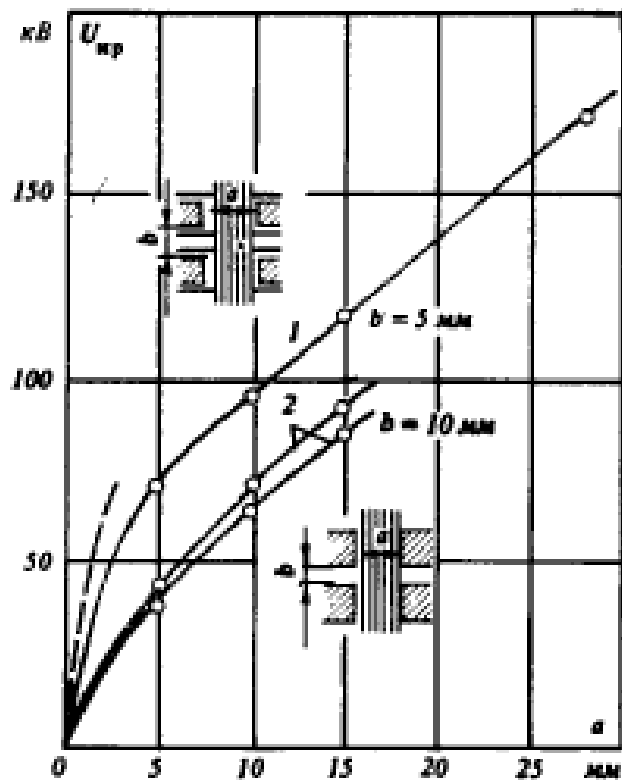


Рис. 1.19. Залежність напруги критичних часткових розрядів від відстані a - між електродами при різній товщині ізоляції котушок і різній b - відстані між котушками одного потенціалу[11]

Визначення поля при різних товщинах ізоляції показало, що напруженість в масляному прошарці проходить через максимум на деякому віддаленні від початку масляного зазору. Характерне розподілення напруженості на поверхні ізоляції у масляного клина приведено на рис. 1.18. Залежності напруженості критичних часткових розрядів від відстані між електродами a при різних товщинах ізоляції котушок і відстань b між котушками одного потенціалу приведені на 1.19. Визначення поля при різних відстанях між обмотками a і між котушками одної обмотки b показало, що в той час як напруженість в масляній прошарці, відповідно виникненню критичних часткових розрядів змінюється дуже швидко, повздовжня складова напруженості залишається практично без зміни і рівна приблизно 75кВ/см[1].

1.3.3 Особливості розвитку ЧР в ізоляції електричних машин

Для ізоляції обмоток електричних машин широко прийнято поширення композиційна ізоляція, в якій використовується слюда, папір, бітумний лак. В залежності від характеру з'єднувальної ізоляції розділяється на термопластичну та термореактивну. З термопластичних використовується микалентна ізоляція, а в іншій моноліт або слюдо терм.

У високовольтних електричних машинах при робочій напрузі впродовж довго часу існують часткові розряди, що не приводять до зниженню електричної та механічної міцності. Вони мало впливають на надійність та довговічність ізоляції, так як в склад їх ізоляції входить неорганічний діелектрик - слюда. Зазвичай ЧР виникають у газових включеннях у товщині ізоляції. Виникнення великих газових включень може призвести до інтенсивних часткових розрядів, що буде причиною руйнування ізоляції.

У процесі експлуатації ізоляція електричних машин має дію на неї багато факторів: вібрація, робоча напруга, температура, вологість, перенапруга, тощо. Зв'язку з цими факторами вибір товщини ізоляції потрібен дуже дбайливий. Встановлений зв'язок між товщиною ізоляції та робочою напругою електричної машини і може бути вчисленою за формулою:

$$d = 1,45 + 0,24 U_{\text{ном}} \quad 1.28$$

Були проведені розробки які дозволили зменшити товщину ізоляції та збільшити допустиму напругу.

Розглянемо допустиму напруженість в газовому включенні, що може призвести до часткових розрядів.

$$E_{\text{в}} = \frac{U_m}{d_{\text{в}} + \frac{\epsilon_{\text{в}} d_{\text{д}}}{\epsilon_{\text{д}}}} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \left(d_{\text{в}} + \frac{\epsilon_{\text{в}} d_{\text{д}}}{\epsilon_{\text{д}}} \right)} \quad 1.29$$

де $d_{\text{в}}$ – товщина повітряного включення,

$d_{\text{д}}$ – товщина ізоляції твердої.

Тоді, можемо визначити формулу для номінального значення напруги :

$$U_{\text{НОМ}} = \frac{E_{\text{В}} (4d_{\text{В}} + 1,45)}{4,1 - 0,24E_{\text{В}}}$$

1.30

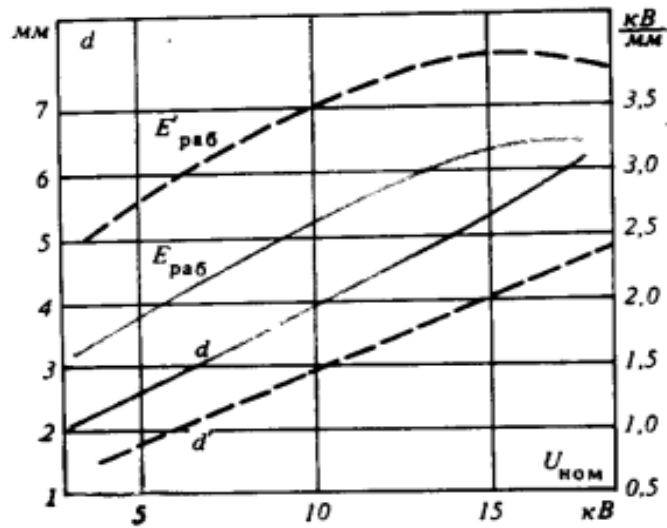


Рис.1.20. Залежність товщини ізоляції і робочих напруженостей від номінальної напруги[1].

Якщо замінити напруженість на товщину газового включення можемо отримати залежність між номінальною напругою та товщиною рис.1.21.

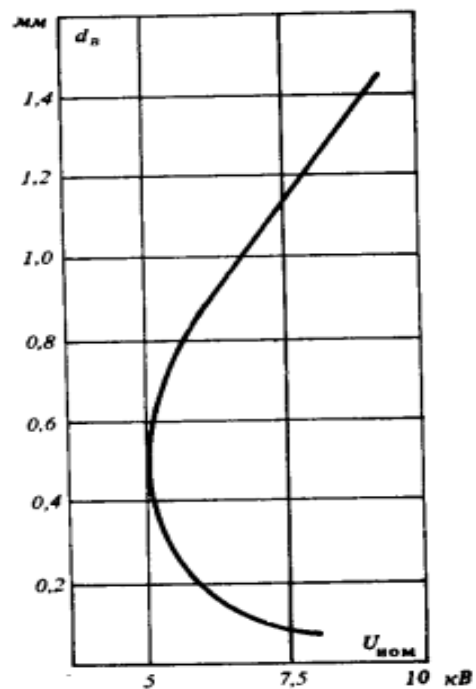


Рис.1.21. Залежність товщини газового включення при номінальній напрузі[1].

З рисунка слідує, що часткові розряди мають місце у машин номінальною напругою 6кВ та вище. Також може бути за використання більш високих напруг при тонкій ізоляції поява ЧР можлива. Великою небезпекою є газові включення із товщиною 0.25 – 0.6мм, при якому ЧР виникають за малих напруг.

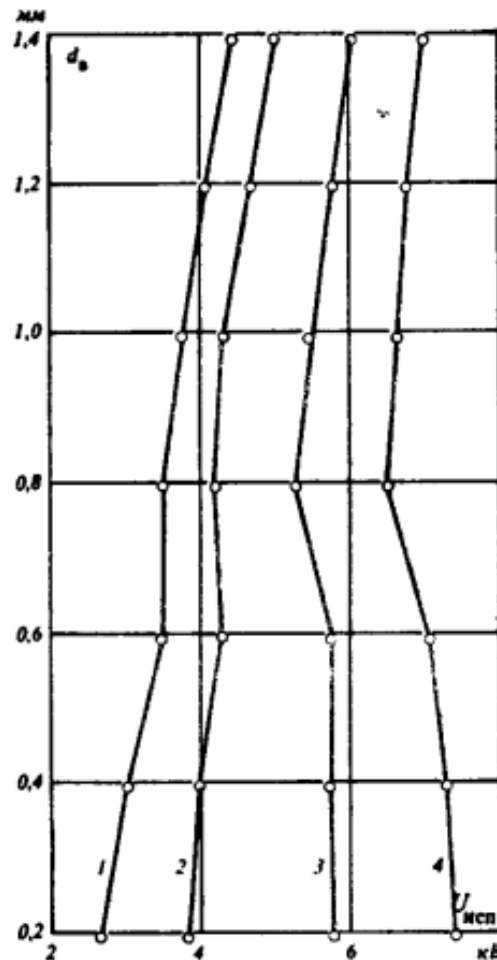


Рис.1.22. Залежність товщини газового включення, від напруги, що приводить ЧР у включеннях для генераторів різної напруги.

1 – 3кВ, 2 – 6кВ, 3- 10,5кВ, 4 – 15,75кВ[1].

При випробуванні машин напругу яку встановлюють із відношення:

$$U_{нсп} = 2U_{ном} + 3 \quad 1.31$$

В микалентній і термореактивній ізоляції у процесі старіння її, можуть створюватись повздовжні щілини, розміщені паралельно електродам. Через це виникає тангенціальна складова, де $E_0=2,2\text{кВ/мм}$ – пробивна напруженість повітря.

Найбільша напруженість знаходиться на кутах струмопровідних частинах. Залежність коефіцієнта нерівномірності поля в пазу статора між відношення радіуса заокруглення міді до товщини ізоляції приведена на рисунку 1.23.

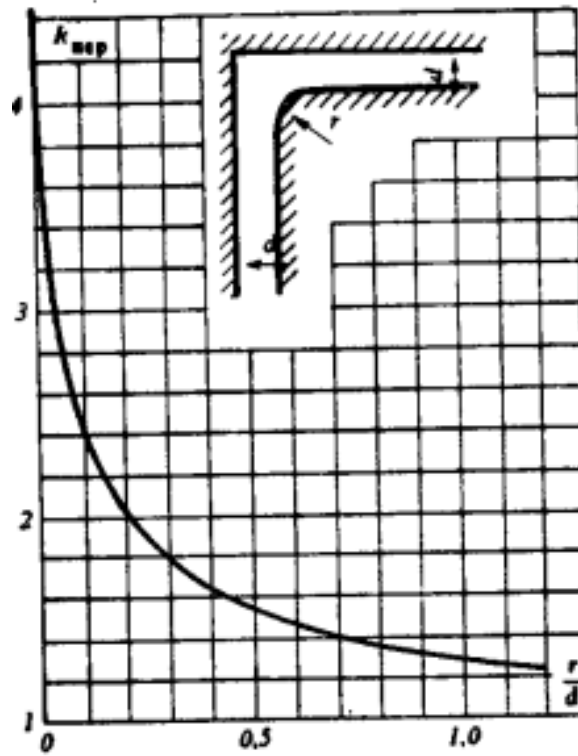


Рис.1.23. Залежність коефіцієнту нерівномірності поля від відношення радіусу заокруглення міді до товщини ізоляції[1].

Максимальна напруженість на поверхні міді:

$$E_{\max} = \frac{U}{d} \sqrt[3]{1,8d/r + 1} \quad 1.32$$

Емакс не може бути достатньо для пробою між прошарками. Але при пробої між прошарками ізоляційних стрічок, може бути тангенціальна складова що приведе до поверхневих розрядів. Заряд може перевищити у 2 рази за розрахунковий допустимий та складати 10 мкКл[13].

Висновки по розділу

Розділ описує причини виникнення часткових розрядів. Вони бувають у різних електричних обладнаннях: конденсаторах, кабелях, трансформаторах та електричних машинах. До кожних із під пунктів, наведено формули та графіки за якими можна розрахувати: напругу виникнення ЧР, максимальну напруженість, товщину ізоляції, тощо.

2 Способи вимірювання – схеми, характеристики, способи калібрування

2.1 Схеми та методи вимірювання ЧР

Методи реєстрації ЧР можливо поділити на групи.

Не електричні методи.

Реєстрація світіння ЧР. Цей метод використовується при проведенні наукових досліджень. Він дозволяє реєструвати ЧР на краях електродів. Використання фотоелектронних помножувачів дозволяє реєструвати ЧР до 0.001пКл. Цей метод є надчутливим та визначити легко навіть при великих завадах. [20]

Акустичний метод. Одне з головних плюсів методу, можливість реєстрації ЧР у середині не прозорих об'єктів великої ємності. Чутливість цього методу є нижча за попередній та залежить від товщини звукоізоляційних пристроїв. Визначення на слух, 1000пКл при товщині біля 5мм. [21]

Спеціальні мікрофони дозволяють підвищити чутливість до 50пКл.

Електричні методи.

Чутливість цих методів вища, за методи не електричні, їх є три види.

Непрямий метод. Він визначає діелектричні втрати за допомогою виміру тангенсу кута діелектричних втрат або виміри вольт-кулонових характеристик та створювати залежність тангенсу від напруги виникнення ЧР. При вимірах цим методом стається сума різних втрат в діелектрику, то важко виділяти втрати які завдяки частковим розрядам створені. [8]

Реєстрація за допомогою антен. Схеми виміру застосовуються для антен в роботі діапазоні метрових та сантиметрових хвиль. Використання своє знайшло у лініях електропередач. [1]

Реєстрація високочастотних коливань. Такі схеми дозволяють надійно вимірювати ЧР та забезпечити високу чуйність. Розглянемо далі такі схеми так як вони є дуже важливими та представимо на рисунку 2.1.

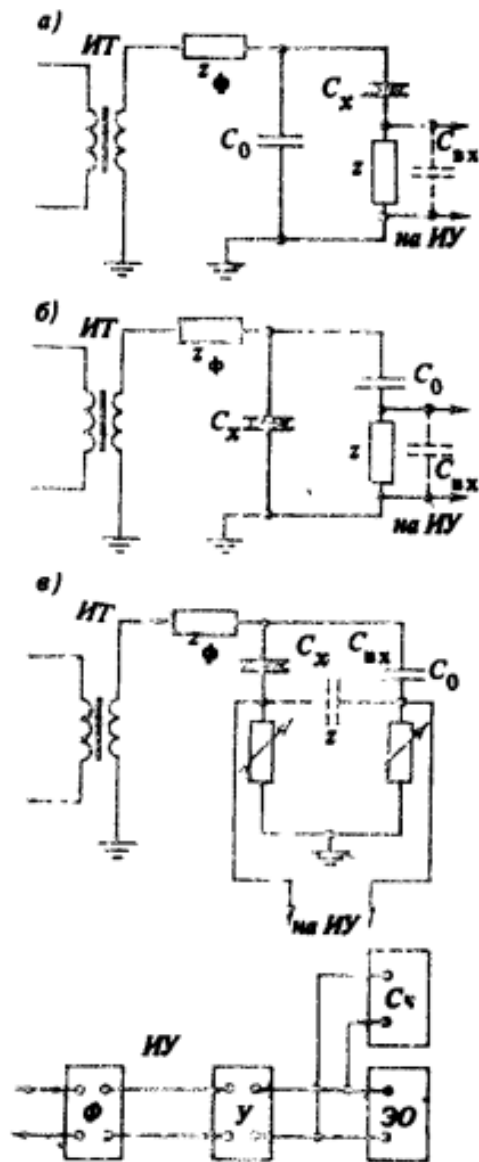


Рис.2.1. Схеми установок виміру характеристик ЧР

Ф – фільтр верхніх частот, У – підсилювач, ЕО – електронний осцилограф, $C_{\text{ч}}$ – рахівник імпульсів[1].

В кожену схему входить трансформатор, об'єкт експерименту, конденсатор, вимірювальний елемент, вимірювальний пристрій. Між джерелом ВН та частиною схеми вмикається фільтр для зменшення зовнішніх поміх.

Джерело ВН та з'єднувальний конденсатор не повинні мати ЧР, що заважають виміру ЧР на об'єкті.

Система шин установки повинна бути здійснена у форматі труб або другим методом, щоб не було корони або інших розрядів.

Рис. 2.1.а. схема із включеним вимірювальним елементом у схему заземленого об'єкту випробування. 2.1.б. схема із конденсатором. 2.1.в. мостова схема.

В залежності від опору об'єкту та місця підключення схеми можуть бути аперіодичними та коливальними.

У мостовій схемі застосовують регульовані мало індуктивних активних опорів.

Активний опір використовується при широкополосних вимірювача. Котушку індуктивності – вузькополосного вимірювача.

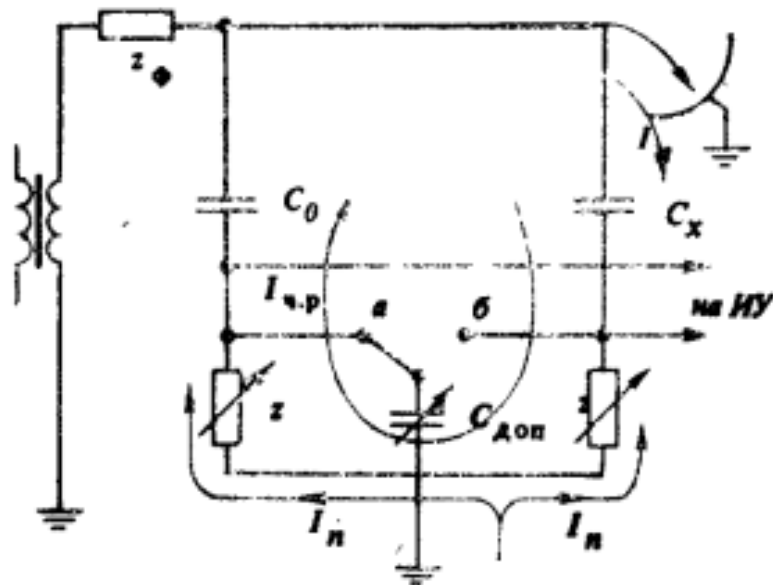


Рис.2.2. Схема для послаблення сигналу внутрішніх завад[1].

Проблема захисту від завад, найбільш актуальна при реєстрації слабких ЧР. Надійна реєстрація слабких сигналів являє собою важкою проблемою.

Електричні поміхи, що заважають реєстрацію ЧР, прийнято розділяти на внутрішні та зовнішні. До зовнішніх відносяться свої шуми вимірювального приладу або коливання в мережі живлення. Внутрішні вважаються сигнали: коронного розряду, що присутні на вводах виробу чи на елементах схеми.

Одним із методу боротьби із завадами є вибір схеми. Одна із захищених схем є мостова. Вона не пропускає велику кількість завад та допомагає реєструвати ЧР на імпульсній напрузі.

Рисунку 2.2. показує принцип ослаблення внутрішніх завад. Джерело зовнішніх завад, корона, має ємність на землю, то струм, джерела завад, що замикається на землю, створює зустрічне падіння напруги на елементах вимірюваного опору, включених послідовно ємності. Опір цих елементів, а також ємність що підключається для компенсації паразитної ємності елементів або в точці а, або в точці б, можуть бути підібрані таким чином, що напруга вході вимірювального приладу від завад було б близьким до нуля. В той же час струм ЧР викликає падання напруги на обох елементах вимірювального опору, що реєструється[1].

Екранування схем також ефективний спосіб, знижує на 2 -3 ступеня завад. Екранування проводять не лише випробувального стенду, але й всього кабінету або приміщення. Внутрішні завади або завади що спричиняються мережею таким методом виправити не можливо. Лише автономна мережа, фільтри, роздільні трансформатори можуть змінити ситуацію із внутрішніми завадами або мережею.

Зменшення внутрішніх завад потрібно збільшення напруги корони на елементах високовольної схеми, шляхом збільшення діаметру проводів та зменшення гострих кутів. Зазвичай сигнали ЧР мають однакову структуру на позитивній і від'ємній полярності. Сигнали від корони значно залежать від полярності.

Метод короткої реєстрації у часу допоможе зменшити внутрішні завади. Виникнення ЧР та їх завад допомагає розрізнити, але не можливо при впливових зовнішніх завадах.

Процеси що протікають в схемі при ЧР. Зменшення напруги визначимо:

$$\Delta U_x = \frac{q_{\text{ч.р}}}{C_{\Sigma}} \quad 2.1$$

Довжина скачка напруги визначається довжиною його процесу пробою. Зниження на об'єктів може проходити по експоненціальному законі:

$$\Delta u_x = \Delta U_x (1 - e^{-t/\tau_{ч.р}}) \quad 2.2$$

Можливо прийняти форму зміни напруги на об'єкті при ЧР у виді прямокутного імпульсу. В перший момент часу у схемі напруга буде обернено пропорційна ємностям і імпульс:

$$\Delta U_{вх0} = \Delta U_x \frac{1/C_{вх}}{\frac{1}{C_{вх}} + \frac{1}{C_0}} = \frac{q_{ч.р}}{C_x + C_{вх} + C_{вх} \frac{C_x}{C_0}} = \frac{q_{ч.р}}{C_{сх}} \quad 2.3$$

Якщо на вході підсилювача активний опір, то сигнал на вході має форму експоненти.

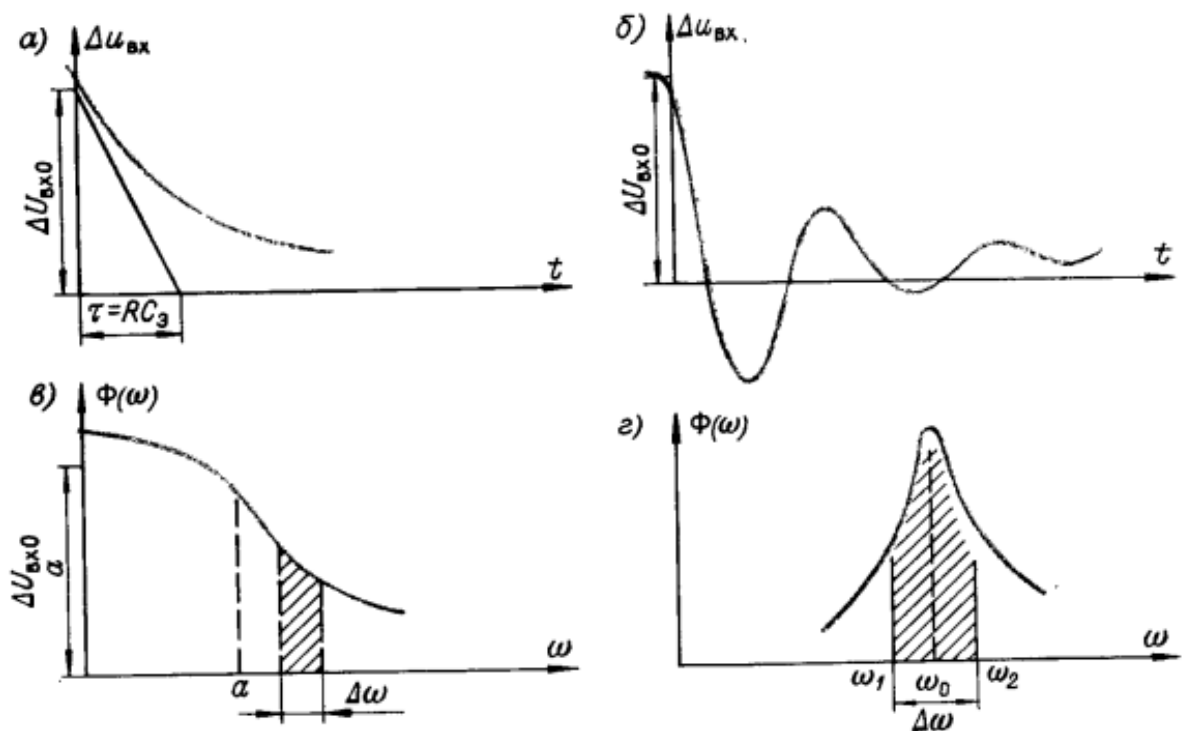


Рис. 2-3. Сигнали на вході усилителя и их спектры: а — сигнал $\Delta u_{вх} = \Delta U_{вх0} \exp(-\alpha t)$; б — сигнал $\Delta u_{вх} = \Delta U_{вх0} \exp(-\alpha t) (\cos \omega_0 t - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t)$; в — спектр сигнала а; г — спектр сигнала б

Якщо на вході ВП включена котушка індуктивності, то форму сигналу має вид коливань що тухне:

$$\Delta u_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}0} e^{-\alpha t} \left(\cos \omega_0 t - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right),$$

где

$$\alpha = \frac{R_K}{2L}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_3} - \alpha^2}; \quad 2.4$$

Для виміру уявного розряду ЧР потрібно мати схему з ВП, покази якого пропорційні заряду, що протікає через вимірювальний елемент.

За таких умов буде пропорція.

$$q_{\text{ч.р}} = \Delta U_{\text{вх}0} C_{\text{сх}}, \quad 2.5$$

Вираз 2.5 є виходом із того, що джерело ЧР замінений генератором імпульсів, з'єднаних послідовно із випробувальним елементом, фронт імпульсу має бути прямокутний.

Амплітуда імпульсу на вході підсилювача пропорційна скачку напруги на об'єкті, постійна часу вимірювальної схеми більше довжини фронту.

Якщо вимірювальним елемент представляє собою резистор, то на опорі буде фіксуватись напруга, пропорційна струму. За для оцінки заряду необхідно реєструвати форму імпульсу струму[1]:

$$i_R(t) = \frac{\Delta u_R(t)}{R}$$

$$Q_R = \int_0^{t_{\text{ч.р}}} i_R(t) dt. \quad 2.6$$

2.2 Прилади для виміру характеристик ЧР

Для реєстрації ЧР застосовуються два види вимірювальних приладів: аналогові та дискретні. В аналогових при проходженні по вимірювальному тракту вхідного сигналу розмір не міняється, в дискретних є перетворення вхідного сигналу у імпульси.

Аналогові складаються із фільтра верхніх частот, підсилювача, індикаторного приладу, імпульсний вольтметр, осцилограф, рахівник. Для

реєстрації ЧР використовують вимірювачі радіо завад або спеціальні ВП з вузькополосними підсилювачами, що пропускають 10кГц при настройці в 1МГц.

Недолік – мала можливість корегування по часу через коливальні процеси у високовольтній схемі. Покази залежать від частоти ЧР тому покази реєструються в мікрровольтах. Можливо у зоні насичення підсилювача, також будуть не коректні дані, через їх відсутності на калібровці[1]



Рис.2.4. Структурна схема випробувального приладу[1]

Можливий вимір таким приладом уявний заряд, частоту імпульсів, проводити нагляд та реєстрацію імпульсів за допомогою осцилографа. Може представляти коливальним контур LC, індуктивність, активний опір і трансформатор. Резонансні частоти для контурів: 10, 20, 47, 92, 145, 210 кГц.

Підсилювач є широкополосним і складає із попереднього підсилювача та осиного підсилювача та з коефіцієнтом підсилення 10^6 . Амплітуда та середнє значення уявного заряду вимірюються за допомогою пристроїв з індикаторами. Наведена схема, що реєструє ЧР до 10^4 імпульсів/с [1].

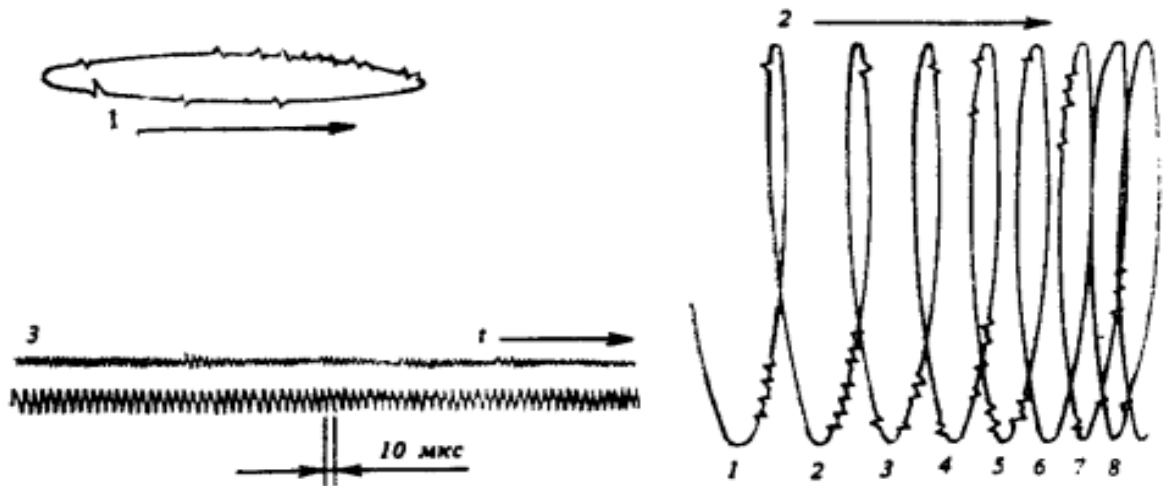


Рис. 2.5 Осцилограма ЧР при різних видах розгорток[1]

В приладі КОРОНА-2 для різносторонній випробувань характеристик и сполучання повно інформації про ЧР. Структурна схема зображена на рисунку 2.6.

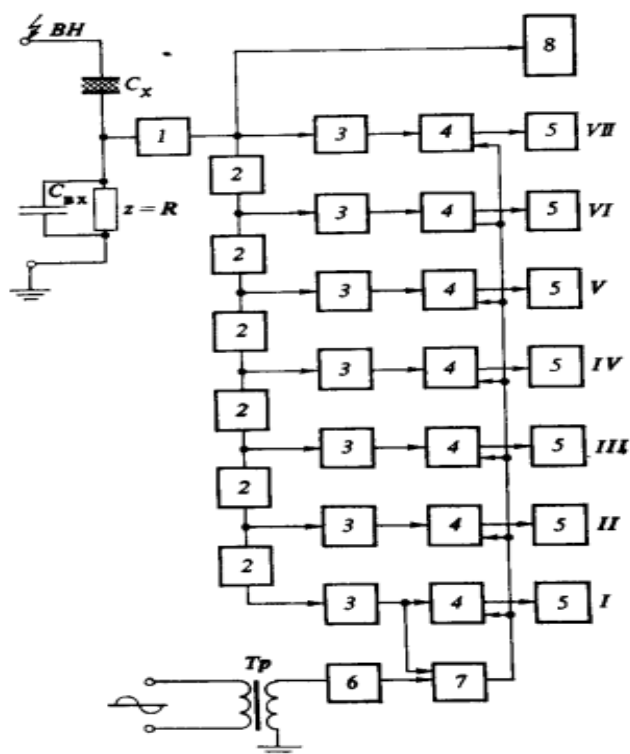


Рис. 2.6. Схема ВП «Корона-2» [1]

1 – підсилювач, 2 – підсилювач з обмеженням, 3 – одновібратор, 4 – блок логіки, 5 – рахівник імпульсів, 6 – фазорегулятор, 7 – реле часу 8 – осцилограф

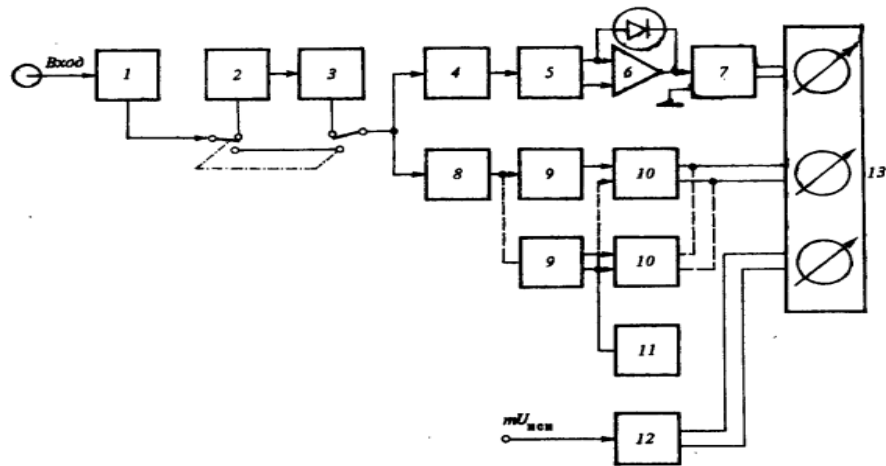


Рис.2.7 Схема приладу «Корона – 5»[1]

1 – емітний повторювач, 2 – дільник напруг вхідних сигналів, 3 – полосовий фільтр, 4 – дільник каналу середнього струму, 5 – підсилювач, 6 – операційний підсилювач, 7 – балансний підсилювач, 8 – дільник каналу, 9 – пороговий підсилювач, 10 – тригер із окремими входами, 11 – генератора скидування, 12 – схема виміру випробувальної напруги, 13 – самописний пристрій

Чутливість у прилад від 0,1 до 1 мВ. Число каналів амплітудного селектора складає 7. Частота 50 Гц. Напруга в мережі 220В. Потужність складає 330 Вт. Маса 100кг. [1]

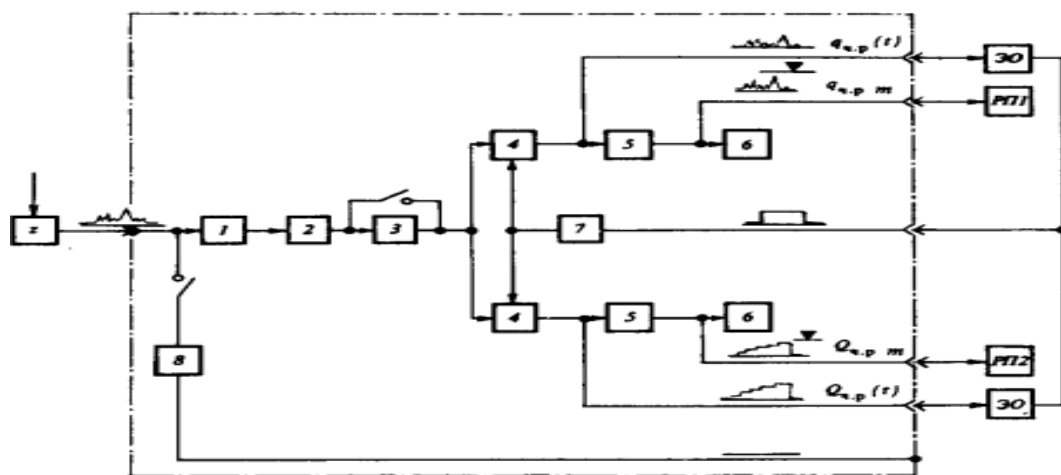


Рис.2.8 Структурна схема приладу MUT – 8[1]

1 – перемикач полярності, 2 – підсилювач, 3 – каскад для зменшення зовнішніх поміх, 4 – інтегрований канал, 5 – каскад для зміни заряду, 6- вимірювальний елемент, 7 – блок управління, 8 – генератор сигналів

ВП МУТ 8 що є представником німецького виробництва, виконано на транзисторах і допускає одночасну зміну заряду одиничних ЧР та сумарного заряду ЧР. Можна вирахувати: частоту повторних імпульсів, уявний заряд, середній струм, сумарний уявний заряд, середню потужність. [1]

Технические данные устройства МУТ-8

Кажущийся заряд	1 пКл — 1000 пКл
Суммарный заряд	1 пКл — 2 мкКл
Минимальный кажущийся заряд, регистрируемый осциллографом	0,05 пКл
Спектр частот	10 кГц — 10 МГц
Минимальная длительность импульса ч. р.	0,01 мкс
Максимальная длительность импульса ч. р. при измерении $q_{ч.р.}$	0,5 мкс
Максимальная длительность импульса при измерении суммарного заряда $Q_{ч.р.}$	10 мкс
Частота повторения импульсов	50 Гц — 200 кГц
Интервал времени	0,1 — 20 мс
Входное сопротивление	150 Ом
Частота и напряжение сети питания	50 Гц, 220 В
Потребляемая мощность	100 Вт
Габариты	540×360×193 мм
Масса	10 кг

Рис.2.9. Технічні данні ВП МУТ – 8[1]

2.3 Калібрування ЧР

Задача калібрування і градуювання є перевірка можливості вимірної системи виміряти нормативні характеристики ЧР[3].

Калібрування та градуювання застосовується для визначення масштабного коефіцієнту K , який необхідний для виміру уявного заряду. Так як ємність об'єкту впливає на характеристики схеми, то градуювання повинно проводитись для кожного нового об'єкта, якщо ємність відрізняється в межах 10%.

Рекомендовані наступні схеми калібрування та градуювання (рис.2.10а,б), які відрізняються тільки місцем включення вимірної системи – послідовно зі з'єднувальним конденсатором (рис.2.10а), або послідовно з об'єктом (рис.2.10б)[2]:

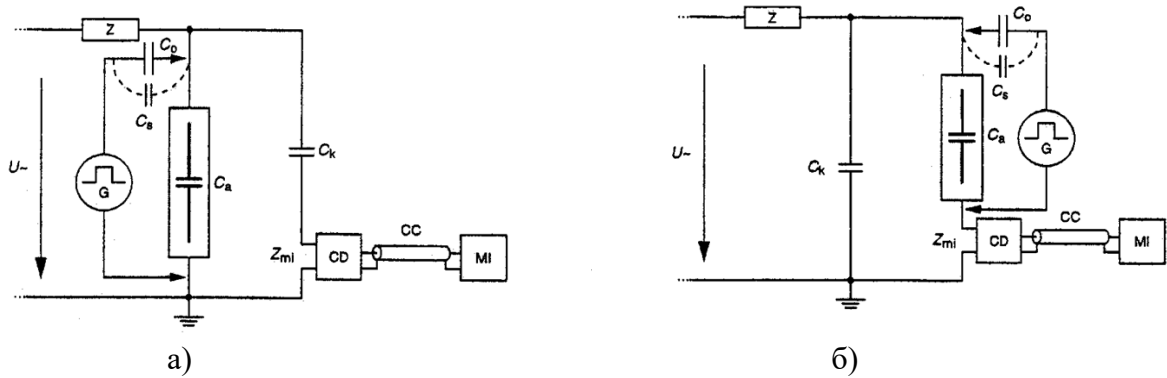


Рис.2.10. U – джерело високої напруги; G – генератор імпульсів калібрувальний; C_0 – градуювальний конденсатор; Z_{mi} – вхідний опір вимірювальної системи; CC – з'єднувальний кабель; C_k – з'єднувальний конденсатор; C_a – випробувальний об'єкт; C_s – паразитна ємність; CD – з'єднувальний пристрій (зазвичай включає в себе фільтр верхніх частот та підсилювач сигналів); MI – вимірювальний прилад; Z – вхідний фільтр (зазвичай фільтр верхніх частот).

Градування вимірювальної системи в повністю зібраній випробувальній схемі проводиться шляхом подачі короточасних імпульсів струму з часом наростання не менше ніж 60 нс від генератора G через градуювальний конденсатор C_0 відомої величини уявного заряду $q_0 = U_0 C_0$ на виводи випробувального об'єкту. Для того, щоб градування вважалось дійсним, необхідно забезпечити співвідношення між градуювальним конденсатором та ємністю об'єкту $C_0 < 0,1 C_a$. [2]

Умовно схему градування можна назвати послідовною (рис.2.11).

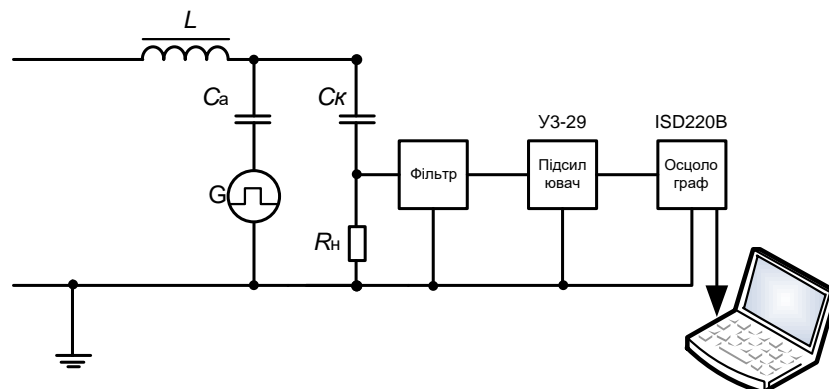


Рис.2.11 Схема градування ЧР[2]

Градування виконувалось на випробному стенді, описаному в [2.11]. В основі схеми покладена умова включення генератора імпульсів G послідовно з

об'єктом випробування. При такому включенні враховуються всі паразитні параметри випробувальної схеми автоматично, в протиположності схемам на рис.1, де такі паразитні параметри необхідно було враховувати окремо при проведенні градування. Крім того зникає необхідність у градувальному конденсаторі з жорсткими вимогами до його ємності. При подачі імпульсу від генератора G в об'єкт дослідження Ca вводиться відповідний заряд, який визначається як $q_0 = C_a U_0$ (де U_0 – вихідна напруга генератора G , C_a – ємність випробовуваного зразка ізоляції). В результаті на виході вимірювальної системи буде реєструватись імпульс пропорційний введеному заряду. Якщо визначити відношення амплітуди сигналу, отриманому на вимірювальному приладі, до введеного заряду q_0 ми отримуємо градувальний коефіцієнт k . Коефіцієнт k у подальшому використовується при визначенні величини заряду ЧР у випробовуваних зразках високовольтної ізоляції, які використовуються в дослідженнях. [2]

Реєстрація імпульсів ЧР виконується цифровим осцилографом типу INTRUSTAR ISD220B [4]. Для фільтрації напруги частотою 50Гц застосований фільтр верхніх частот з коефіцієнтом згасання на частоті 50Гц не менше ніж 80 dB. Сигнал імпульсів ЧР підсилюється підсилювачем типу УЗ-29. [2]

Експериментальне дослідження можливостей розробленої схеми показало, що використання пасивного фільтру високих частот в сполученні з підсилювачем УЗ-29 забезпечило досить високу чутливість вимірювання ЧР (0,1-0,5 пКл) у поєднанні з високим рівнем стійкості до електромагнітних завад в умовах роботи діючої лабораторії високих напруг. [2]

На рис 2.12 та рис.2.13 наведені результати градування схеми реєстрації часткових розрядів у зразку електротехнічного картону товщиною 2 мм. На рис.2.12 наведена осцилограма градувального імпульсу амплітудою 10 В, фронт імпульсу - приблизно 10 нс, що задовольняє вимогам стандартів. [2]



Рис.2.12.



Рис.2.13.

На рис.2.13 – відображені калібрувальний імпульс та результат його реєстрації вимірювальною схемою. [2]

Оскільки ємність зразка ізоляції у застосованій системі електродів $C_a \approx 1$ пФ, амплітуда градуовального імпульсу $U_0 = 10\text{В}$, то інжектований заряд склав $q_0 = C_a U_0 = 1,0 \cdot 10,0 = 10\text{пКл}$. При такому заряді реакція вимірювальної схеми склала 2 В. Таким чином градуовальний коефіцієнт дорівнює $k = 5\text{ пКл на вольт}$. [2]

Методики калібрування установки для реєстрації характеристик часткових розрядів показали, що вона може використовуватись досить ефективно в випадках, коли досліджуваний об'єкт на час градування може бути від'єднаний від заземленого електроду. Результати реєстрації калібрувальних імпульсів показали, що вони можуть бути надійно зафіксовані та виміряні з мінімальною похибкою до 10%, (похибка осцилографа), а похибки, пов'язані з паразитними параметрами схеми реєстрації автоматично враховуються при проведенні градування означеною методикою та не потребують додаткових корегувань результатів. Крім цього необхідно відмітити, що існує можливість підвищення чутливості вимірювальної схеми до 0,05 пКл на вольт насамперед за рахунок збільшення підсилення осцилографа мінімум у 100 разів (до 10 мВ/діл, проти використаного на рис.4 – 1 В/діл) без повторного проведення процедури градування схеми. [2]

2.3.1.Калібрувальні генератори

Характеристики калібраторів ЧР характеризуються стандартною невизначеністю.

Калібратор ЧР складається із генератора імпульсів ступеневої напруги з амплітудою, що з'єднаний послідовно із ємністю так, що калібровочні імпульси

ЧР мали заряд із повторною амплітудою. В такому зв'язку імпульси напруги генератора повинні мати час підйому менше 60 нс[3].

Калібратори можуть створювати одно полярні та біполярні імпульси струму. Частота повторень імпульсів може бути фіксованою або змінною. Такі калібратори застосовуються для градуювання вимірювальної системи в повністю укомплектованій схемі випробування для визначення масштабного коефіцієнту.

Рекомендується, щоб калібратор забезпечував характеристики таких параметрів:

1. лінійність калібатора повинна знаходитись в межах 5%,
2. для калібатора, що працює від батареї потрібен датчик стану заряду.
3. регульований час затримки між двома послідовними імпульсами,
4. біполярні імпульси для визначення амплітуди уявного заряду в залежності від полярності струмів ЧР.

Найпростішим калібровочним генератором що випустила фірма DIMRUS являється генератор марки GKI-I. Він створений для використання по принципу «включив – працює». На ньому немає органів управління, лише тумблер включення. В залежності від типів переносних вимірювальних пристроїв, калібровочні імпульси можуть мати різні частотні та часові параметри.[3]

Генератор живиться від двох батарей. Їх вистачає на 10 годин роботи генератора.

Його корпус із міцного металу датчик та індикатори захищені. Через він є універсальним та надійним у своєму сегменті.



Рис.2.14. GKI-I[3]

GKI-2. Малогабаритний калібровочний генератор застосовується перед випробування на визначення часткових розрядів. Він може бути використаний в лабораторних так і польових випробуваннях. Робота у навколишньому середовищі допускається до -20 градусів по Цельсію. [3]

Керування ним можливе за допомогою плівкової клавіатури, інформація відображається на рідко кристалічному індикаторі. [3]

Час роботи не змінився від попередньої версії. Але має зарядний прилад який можна підключати під роботи. Він інjektує заряд в датчики рівний 3000pK.

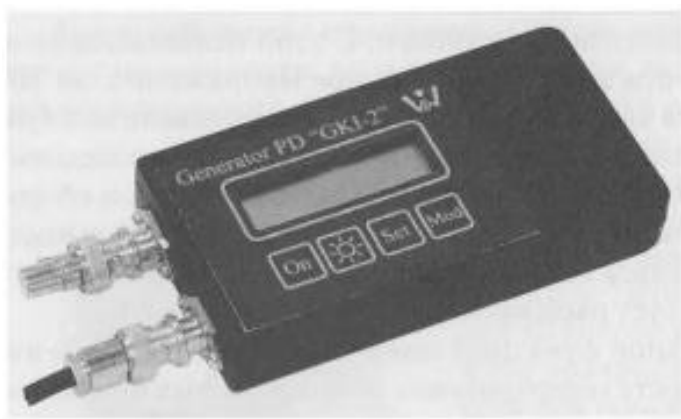


Рис.2.15. GKI-II [3]

GKI-3. Даний вид генераторів може бути використаний для калібровки схем виміру ЧР у трансформаторах та електричних машинах. Вихідний сигнал становить до 200В. Величина вихідного імпульсу вибирається користувачем, виходячи із поставленої мети. [3]

Допоміжна функція представлена у новій версії те що вона може генерувати прямокутні імпульси напруги.



Рис.2.16. GKI-III [3]

GKI-4. Вихідний сигнал максимальним став до 20В, що порівняно менше ніж у попередній версії. Можливо регулювати полярність без перемикання кабелю. [3]



Рис.2.17 GKI-4

Генератор імпульсів точної амплітуди Г5-75 створений для визначення, настройки і випробування систем та приборів. Генератор забезпечує на основному виході при навантаженні 50 Ом одинарні імпульси періодичної послідовності додатної або від'ємної полярності[22].



Рис.2.18 Генератор импульсов точной амплитуды Г5-75[22]

Висновки до розділу

У другому розділі розглянуто, що допомагає реєструвати, калібрувати, підбирати методи для виміру часткових розрядів. Описав електричні та не електричні методи реєстрації, якими користуються у дослідженнях. Схеми за якими зменшують кількість поміх при реєстрації для більш точного аналізу. Представлений опис генераторів калібровки для виміру ЧР та їх зовнішній, наглядний, вигляд.

Основну увагу надав методу калібрування, схемам вимірювання ЧР в об'єктах малої ємності. Запропонована «послідовна» схема калібрування та показані її основні можливості.

3. Розробка експериментальної установи для вимірювання ЧР

3.1 Розробка схеми установки та опис конструкції

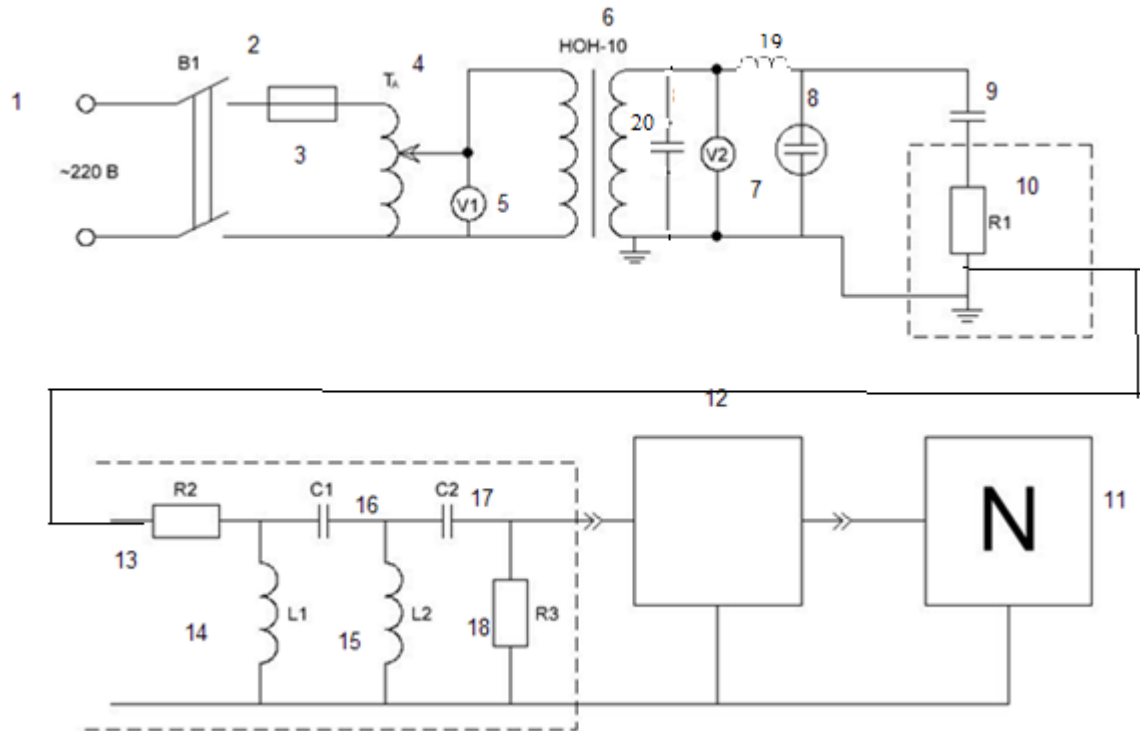


Рис.3.1. Схема випробувальної конструкції. 1– джерело напруг, 2– вимикач, 3– запобіжник; 4–авторансформатор; 5– вольтметр низьковольтний, 6– трансформатор високовольтний; 7– вольтметр С196; 8– комірка для встановлення зразків ізоляції; 9– з'єднувальний конденсатор Р5023, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18 – елементи вузла приєднання разом з фільтром ВЧ; 11– цифровий осцилограф ISDS220B ; 12– підсилювач УЗ-29, 19, 20 – фільтр нижніх частот.

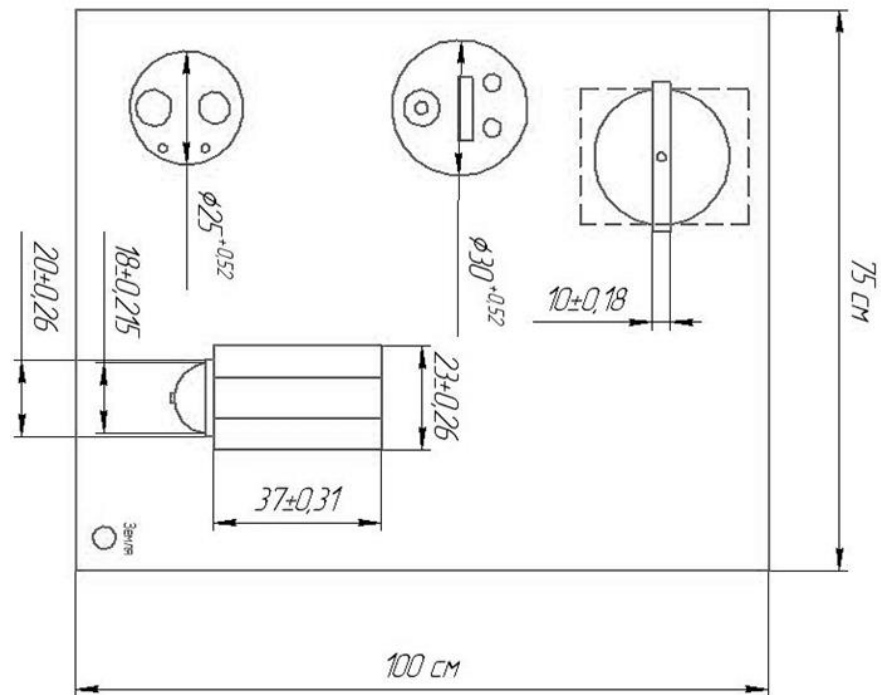


Рис.3.2. Схема експериментальної установки



Рис 3.3. Установа для моделювання
часткових розрядів

- 1 – фільтр високих частот, 2 – НОМ 10, 3 – заземлення
4 – кіловольтметр електростатичний С196

Вимірювальна комірка для зразків ізоляції на рисунку 3.4.

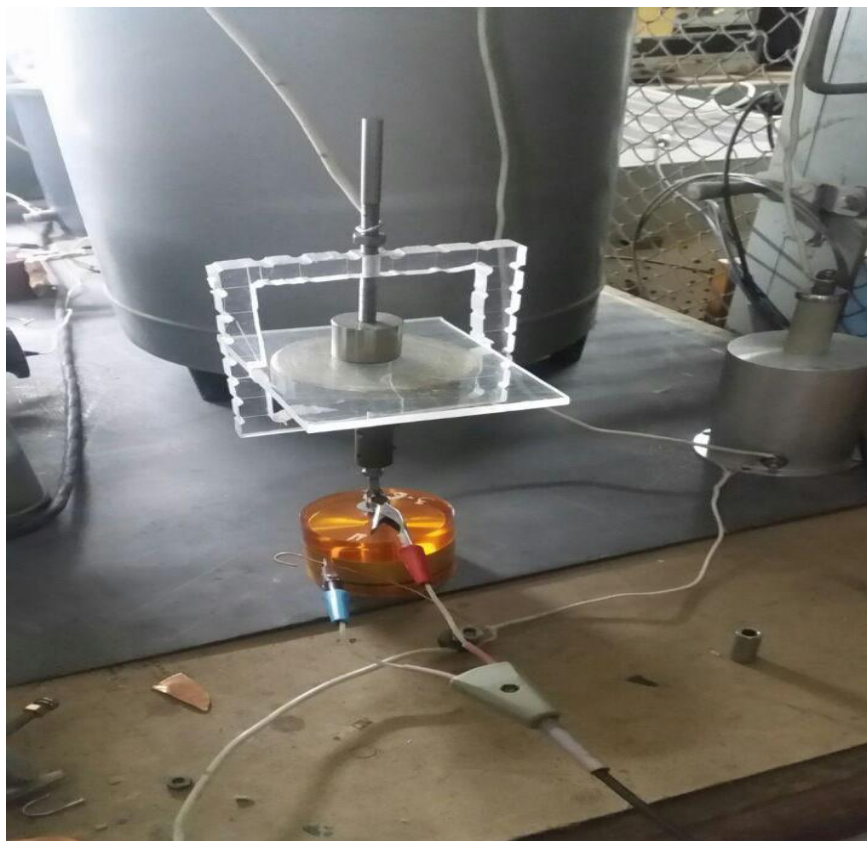


Рис. 3.4. Випробувальний установка із об'єктом оргскло товщиною 5мм.

Генератор імпульсів Г5-75 точної амплітуди, що задавав значення при калібруванні на рисунку 3.5.



Рис.3.5. Генератор імпульсів точної амплітуди Г5-75

3.2 Фільтри та їх класифікація

Фільтр – пристрій для виділення бажаних компонентів електричного сигналу або придушення небажаних.

Електричним фільтр - чотириполюсник, що встановлюється між джерелом сигналів і вимірювальним приладом, слугує для безперешкодного пропускання струмів одних частот і затримки струмів інших частот.[8]

Діапазон частот, які пропускаються фільтром без загасання, називається смугою пропускання. Смуга затримування супроводжується значним загасанням. [8]

Пасивні фільтри застосовуються в чотириполюсниках на основі котушок індуктивності та конденсаторів. Можливе застосування пасивних RC-фільтрів [8].

Типи фільтрів :

- Аналогові та цифрові
- Пасивні або активні
- Лінійні та нелінійний
- Рекурсивні і не рекурсивні

Рекурсивні фільтри діляться на :

- фільтри Бесселя
- фільтри Чебишева
- фільтри Баттерворта

Назва фільтру	Діапазон пропускних частот
Низькочастотний фільтр	$0 \leq \omega \leq \omega_{c1}$
Високочастотний фільтр	$\omega_{c2} \leq \omega \leq \infty$
Полосовий фільтр	$\omega_{c1} \leq \omega \leq \omega_{c2}$
Режекторний фільтр	$0 \leq \omega \leq \omega_{c1}$ та $\omega_{c2} \leq \omega \leq \infty$ де $\omega_{c1} < \omega_{c2}$

Таблиця 3.1. [8]

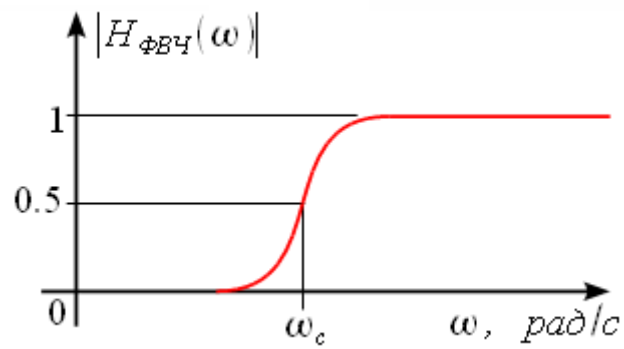


Рис.3.6 АЧХ фільтру високих частот [8]

$$\omega_{c2} \leq \omega \leq \infty$$

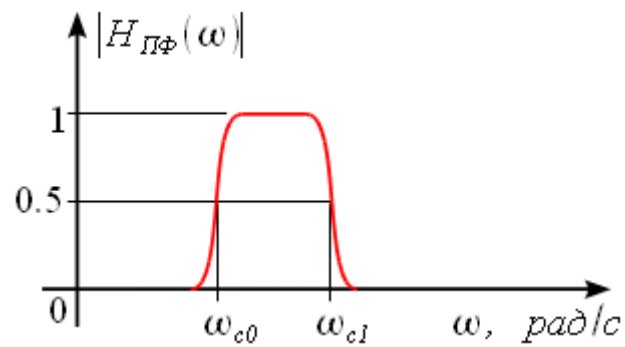


Рис. 3.7 АЧХ полосового фільтру [8]

$$\omega_{c1} \leq \omega \leq \omega_{c2}$$

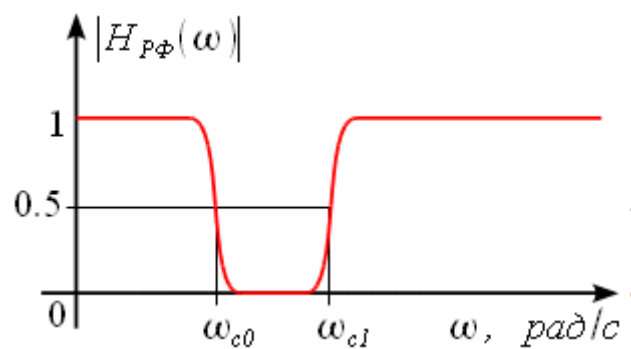


Рис 3.8 АЧХ режекторного фільтру[8]

$$0 \leq \omega \leq \omega_{c1} \text{ та } \omega_{c2} \leq \omega \leq \infty$$

$$\text{де } \omega_{c1} < \omega_{c2}$$

Якщо фільтр із навантаженням, що рівний опіру характеристичному, то напруги, струми на його вході і виході пов'язані:

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{I_1}{I_2} = e^{\gamma} = e^{\alpha + j\beta} = e^{\alpha} e^{j\beta} \quad 3.1$$

В смузі пропускання $\alpha = 0$, за формулою 3.1 $U_1 = U_2$, $I_1 = I_2$ та $\varphi_1 = \varphi_2$. Звідси, справедлива і рівність $P_1 = P_2$, що вказує на відсутність втрат в ідеальному фільтрі, тому фільтр повинен бути створений на основі ідеальних котушок індуктивності та ємнісних конденсаторів. Поза області пропускання в ідеальному випадку $\alpha = \infty$. [8]

Приклад низькочастотного фільтру

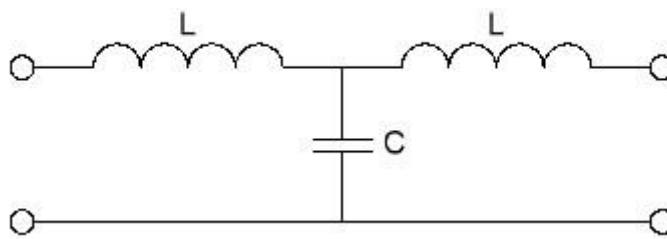


Рис.3.9 Схема низькочастотного фільтру[8]

Співвідношення Т – подібної схеми та коефіцієнтів чотиріполюсника :

$$A = 1 + \frac{Z_1}{Z_3}; B = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}; C = \frac{1}{Z_3}; D = 1 + Z_2/Z_3 \quad 3.2$$

Для фільтру із низькою частотою:

$$A = D = 1 + \frac{j\omega L}{1/j\omega C} = 1 - \omega^2 LC \quad 3.3$$

$$B = 2j\omega L + \frac{(j\omega L)^2}{1/j\omega C} = 2j\omega L - j\omega^3 L^2 C \quad 3.4$$

$$C = \frac{1}{1/j\omega C} = j\omega C \quad 3.5$$

На основі рівнянь чотиріполюсника :

$$A = ch\gamma = ch(\alpha + j\beta) = ch\alpha \cos\beta + jsina \sin\beta \quad 3.6$$

Однак:

$$A = ch\alpha \cos\beta = 1 - \omega^2 LC \quad 3.7$$

В смузі пропускання частот коефіцієнт загасання рівний нулю:

$$\cos\beta = 1 - \omega^2 LC \quad 3.8$$

Так як межі зміни $\cos\beta$ ($-1 \leq \cos\beta \leq 1$), смуги пропускання визначаються нерівністю :

$$-1 \leq 1 - \omega^2 LC \leq 1 \quad 3.9$$

При частоті, що знаходиться у діапазоні:

$$0 \leq \omega \leq \sqrt{\frac{2}{LC}} \quad 3.10$$

Для характеристичного опору фільтра на підставі формул маємо :

$$Z_c = \sqrt{\frac{B}{C}} = \sqrt{\frac{2j\omega L - j\omega^3 L^2 C}{Cj\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}(2 - \omega^2 LC) \quad 3.11$$

Характеристичне опір фільтра прямує до нуля, залишаючись активним. Отже, при навантаженні фільтра опором, що є рівним характеристичному, його вхідний опір також дорівнюватиме Z_c - фільтр працює в режимі резонансу. При частотах, більших $\sqrt{2/(LC)}$, характеристичне опір набуває індуктивний характер. [8]

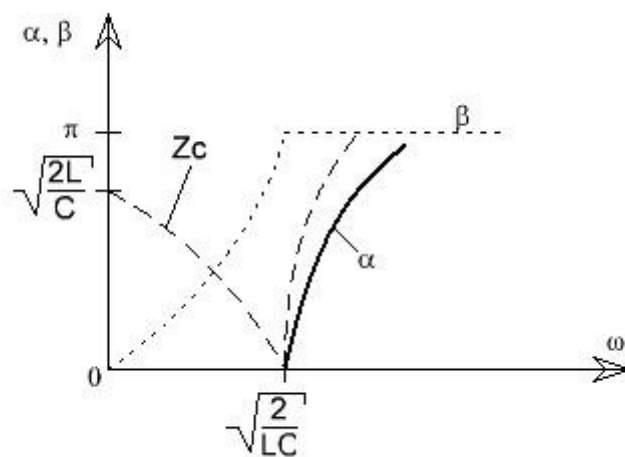


Рис. 3.10 На даному графіку наведені залежності $\alpha(\omega)$, $\beta(\omega)$ і $Z_c \omega$

У смузі затримування коефіцієнт загасання α визначається при $\beta = \pi$. Є факт поступового наростання коефіцієнту згасання, в смузі загасання фільтр не є ідеальним. Аналогічно не ідеальність реального фільтра можна зробити для

смуги прозорості, забезпечити узгоджений режим роботи в усій смузі неможливо, тому коефіцієнт загасання буде відмінний від нуля. [8]

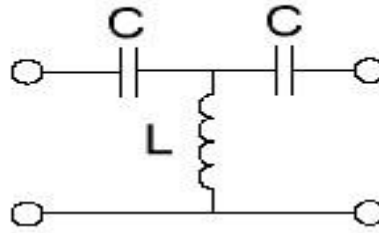


Рис.3.11 Схема високочастотного фільтру

Коефіцієнти фільтра можуть бути визначені:

$$A = D = 1 + \frac{1/j\omega C}{j\omega L} = 1 - \frac{1}{\omega^2 LC} \quad 3.12$$

$$B = \frac{2}{j\omega C} + \frac{(1/j\omega C)^2}{j\omega L} = \frac{1}{j\omega C} \left(2 - \frac{1}{\omega^2 LC} \right) \quad 3.13$$

$$C = \frac{1}{j\omega L} \quad 3.14$$

Як і для розглянутого вище

$$-1 \leq 1 - \frac{1}{\omega^2 LC} \leq 1 \quad 3.15$$

Такій нерівності відповідає:

$$\frac{1}{\sqrt{jLC}} \leq \omega < \infty \quad 3.16$$

Характеристичний опір фільтру є:

$$Z_C = \sqrt{\frac{B}{C}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{j\omega C} \left(2 - \frac{1}{\omega^2 LC} \right)}{1/j\omega L}} = \sqrt{\frac{L}{C} \left(2 - \frac{1}{\omega^2 LC} \right)} \quad 3.17$$

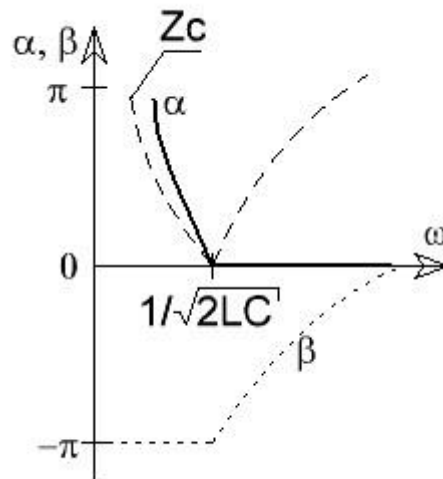


Рис.3.12 Навантажений фільтр характеристичним опором, який знаходиться у резонансному режимі

Смуговий LC-фільтр

Такі типи фільтрів роблять шляхом послідовного з'єднання низьких частот з смугою пропускання $\omega \leq \omega_{c2}$ і високочастотного з пропускну здатністю $\omega \geq \omega_{c1}$, причому $\omega_{c1} < \omega_{c2}$. [8]

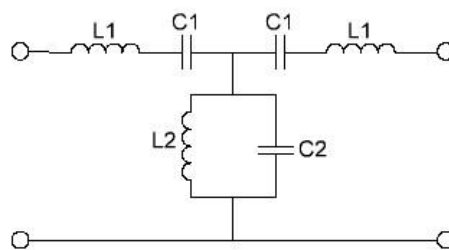


Рис.3.13 Схема найпростішого смугового фільтра[8]

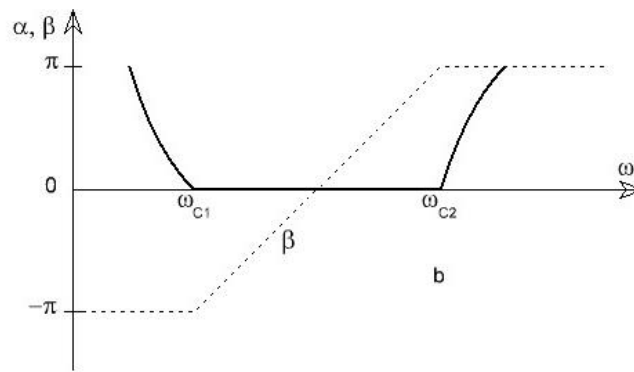


Рис. 3.14 Режекторний LC фільтр[8]

Для поліпшення характеристик фільтрів всіх типів, доцільно виконувати їх у вигляді ланцюгової схеми, що представляє каскадні включені чотириполіусники. При узгоджену режимі роботи всіх n ланок схеми коефіцієнту загасання такого фільтру зростає що наближає фільтр до ідеального. [8]

Фільтр Баттерворта.

Особливістю такого класу фільтрів – те що його амплітудно-частотна характеристика є максимально гладкою на частотах смуги пропускання. [8]

Основним елементом вимірювальної схеми є фільтр верхніх частот. Основна задача такого фільтру в тому, щоб зменшити вплив напруги частотою 50 Гц на систему реєстрації ЧР. Пасивні фільтри верхніх частот будуються по трьом основним схемам:

1. Чебишева
2. Баттерворта
3. Еліптичний

В роботі було прийнято рішення застосувати схему фільтра Баттерворта 4-го порядку. Основні параметри були задані:

1. ослаблення на частоту - 700 Гц,
2. Верхня гранична частота – 1500 Гц.

Представимо схему фільтра, його задані параметри, АЧХ та ФЧХ

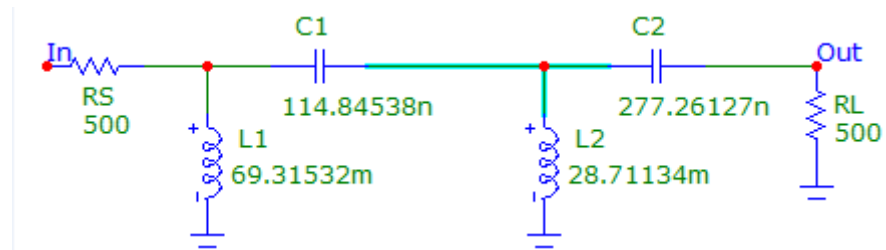


Рис. 3.15. Схема фільтру верхніх частот

Design | Implementation | Опции

Тип фільтра

- ☐ ФНЧ
- ☒ ФВЧ
- ☐ Полосовой
- ☐ Заграждающ

Тип характеристики

- ☒ Баттерворта 4
- ☐ Чебышева 3
- ☐ Эллиптический 3

Основные параметры

☒ Полный ☐ Упрощенный

Коеф. передачи: 0 дБ

Его пульсации R: 3.0103 дБ

Ослабление A: 20 дБ

Верхн. граница Fc: 1500 Гц

Нижн. граница Fc: 700 Гц

Stage	F0	Q0	FN
1	1500	1.306562...	.
2	1500	0.541196...	.

Рис. 3.16. Параметри фільтру верхніх частот

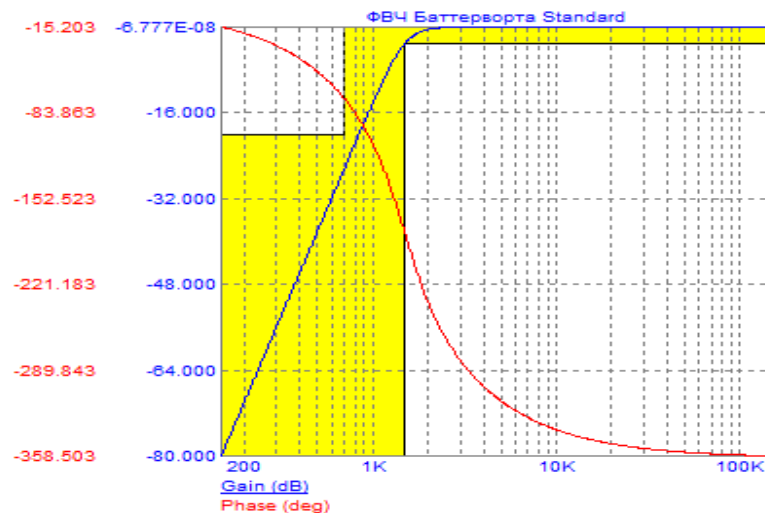


Рис. 3.17. АЧХ та ФЧХ фільтру верхніх частот

де - ФЧХ крива що спадає, АЧХ – крива що зростає.

Виходячи з цього, бачимо що затухання на частоті 50Гц, більше ніж 85dB.

3.3 Розрахунок фільтру нижніх частот

Другим важливим елементом схеми реєстрації ЧР є проектування фільтру нижніх частот ФНЧ (елемент 19, 20 на рис.3.1)

Розрахунок ФНЧ виконувався в програмі MicroCap 9.0.7.0. Схема фільтру приведена на рисунку 3.13.

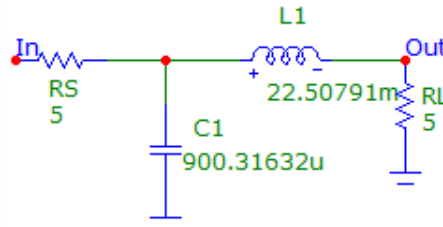


Рис.3.18. Схема фільтру нижніх частот

Основні параметри фільтра:

Тип фільтра:
☒ ФНЧ
☐ ФВЧ
☐ Полосовой
☐ Заграждающ

Тип характеристики:
☒ Баттлерворта 2
☐ Чебышева 3
☐ Эллиптический 2

Основные параметры:
☒ Полный ☐ Упрощенный

Козф. передачи: 0 дБ
 Его пульсации R: 3.0103 дБ
 Ослабление A: 20 дБ
 Верхн. граница Fc: 50 Гц
 Нижн. граница Fc: 1000 Гц

Stage	F0	Q0	FN
1	50	0.707106...	

Рис. 3.19. Параметри фільтру нижніх частот

АЧХ та ФЧХ фільтра представлені на рисунку 3.20.

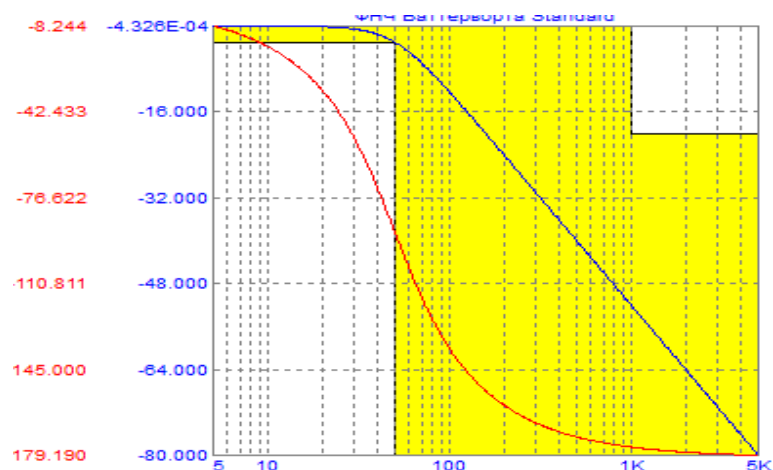


Рис.3.20. АЧХ та ФЧХ фільтру нижніх частот

Виходячи з отриманих даних максимальне затухання на частоті 10кГц, складає близько 50dB, що достатньо для захисту схеми вимірювання ЧР в імпульсних завадах, які поступають із загальної мережі живлення частотою 50Гц.

Індуктивність котушки фільтру (19, рис.3.1) складає 22мГн. Катушка була реалізована на феретивному стержні діаметром 8мм. Розрахунок проводився за допомогою програми Coil32[6], а результати представлені у таблиці 3.2.

Число витків	518
Ефективна магнітна проникність стержня	135
Довжина намотки	103.6 мм

Таблиця 3.2.

Розміщення котушки на випробувальному стенді представлено на рисунку 3.21.



Рис. 3.21. Катушка на феретивному стержні

Висновки до розділу

Розділ посвячений в основному розробці схеми установки, класифікації фільтрів та розрахунку його. Установка складалась із: фільтру низьких частот, трансформатора– НОМ 10, заземлення, кіловольтметр електростатичний С196, випробувального об'єкта та схеми реєстрації з фільтром високих частот. Розглянуто види фільтрів за своїми характеристиками, функціями, межами роботи і тд.

4 Проведення випробувань різних видів зразків ізоляції

Параметри калібрувального генератора Г5-75 вибрано наступними:

1. Період імпульсів – $T = 20\text{ мкс}$,
2. Затримка імпульсів – $D = 0.1\text{ мкс}$,
3. Довжина імпульсу – $\tau = 10\text{ мкс}$,
4. Амплітуда імпульсу – $U = 9.999\text{ В}$.

Осцилограма калібрувального імпульсу наведена на рис. 4.1.

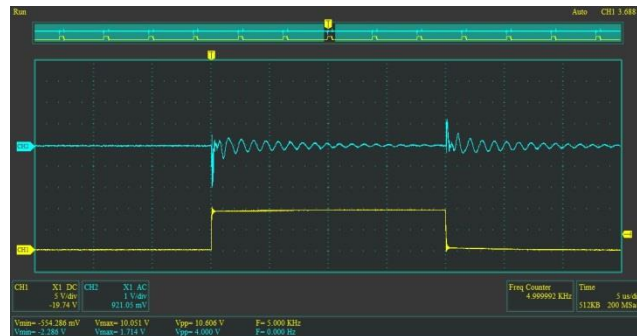


Рис.4.1. Осцилограма калібрувального імпульсу

Швидкість підйому імпульсу складає приблизно 40 нс., що задовольняє вимогам нормативної документації[3].



Рис.4.2. Осцилограма швидкості підйому імпульсу

4.1 Випробування зразка скла товщиною 1.2 мм

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 10мм складала $C_{об}=4$ пФ.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.3.

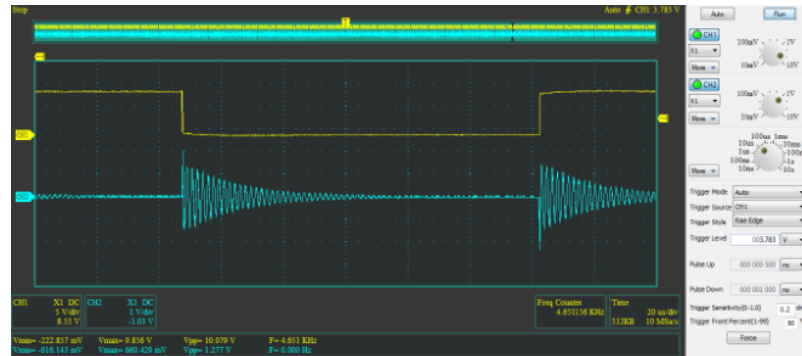


Рис.4.3. Осцилограма калібрувального імпульсу скла товщиною 1,2мм, діаметром електроду 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} \cdot U_{ген} = 40 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі складала:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.6 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{калібрувальний} = \frac{1 \cdot q_0}{U_{сер}} = 25 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка скла товщиною 1.2мм при діаметрі електроду 10 мм представлено на рисунку 4.4.

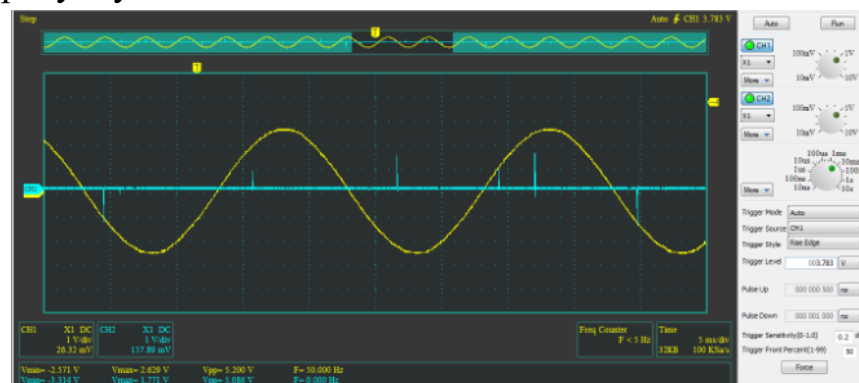


Рис.4.4. Випробування зразка скла товщиною 1.2мм при діаметрі електроду 10 мм

Напруга появи ЧР у зразку скла $U_{\text{чр}} = 2.15 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів скла:

$$U_- = 3.3 \text{ В},$$

$$U_+ = 1.7 \text{ В}.$$

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 2.5 \text{ В}.$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 83.5 \text{ пКл},$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 43 \text{ пКл}.$$

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 25мм скла $C_{\text{об}} = 25.3 \text{ пФ}$.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.3.

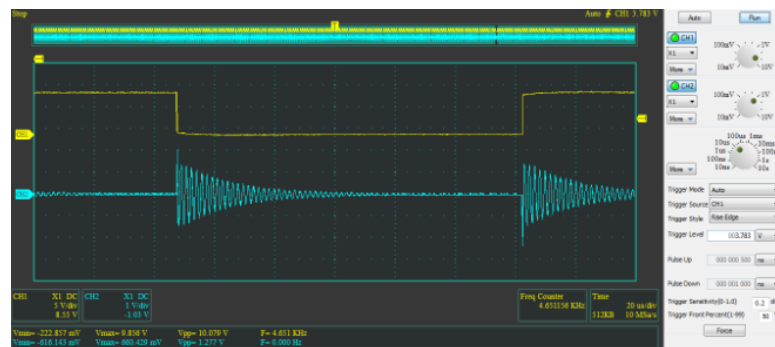


Рис.4.5. Осцилограма калібрувального імпульсу скла товщиною 1,2мм, діаметром електроду 25мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{\text{об}} * U_{\text{ген}} = 253 \text{ пКл}.$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі скла:

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 2.5 \text{ В}.$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{\text{калібрувальний}} = \frac{1 * q_0}{U_{\text{сер}}} = 95.2 \text{ пКл}.$$

Випробування зразка скла товщиною 1.2мм при діаметрі електроду 25 мм представлено на рисунку 4.6.

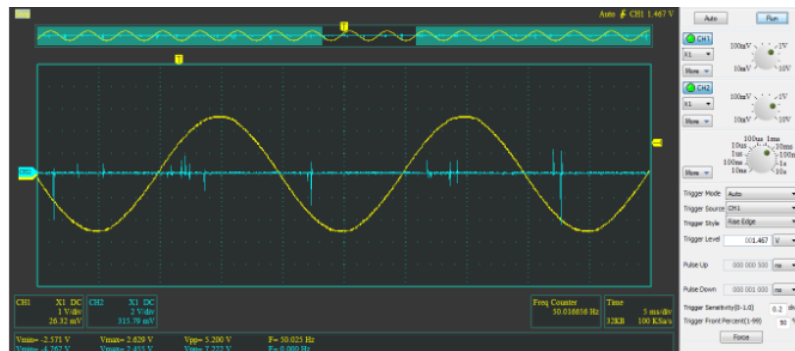


Рис.4.4. Випробування зразка скла товщиною 1.2мм при діаметрі електрода 25 мм

Напруга появи ЧР у зразку скла $U_{\text{чр}} = 2.6$ кВ, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів скла:

$$U_- = 4.76 \text{ В},$$

$$U_+ = 2.28 \text{ В}.$$

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 3.5 \text{ В}.$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 453 \text{ пКл},$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 217 \text{ пКл}.$$

4.2 Випробування зразка скла товщиною 2.3 мм

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 10мм скла $C_{06} = 2.1$ пФ.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.5.

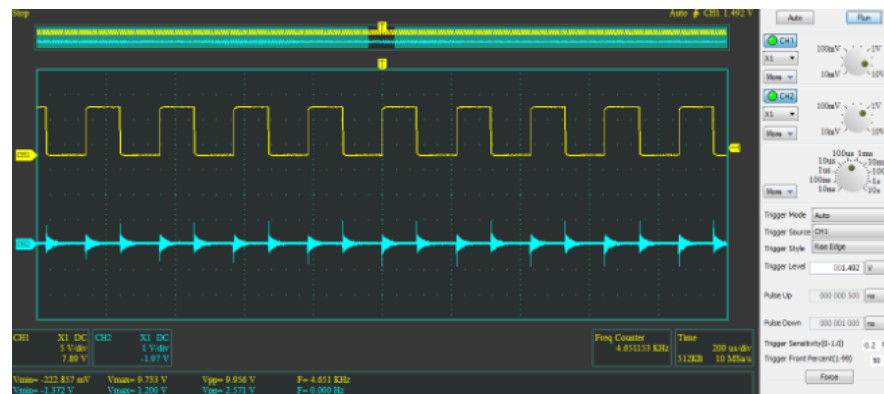


Рис.4.5. Осцилограма калібрувального імпульсу скла товщиною 2.3мм, діаметром електрода 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} * U_{ген} = 21 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі склала:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.25 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{калібрувальний} = \frac{1 * q_0}{U_{сер}} = 25.3 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка скла товщиною 2.3мм при діаметрі електрода 10 мм представлено на рисунку 4.6.

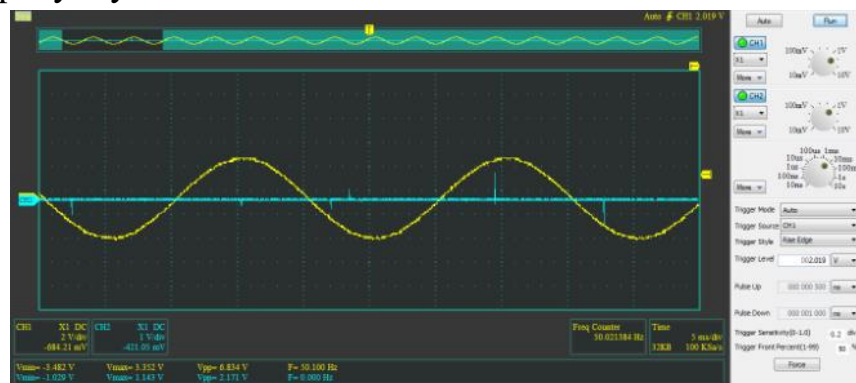


Рис.4.6. Випробування зразка скла товщиною 2.3мм при діаметрі електрода 10 мм

Напруга появи ЧР у зразку скла $U_{чр} = 3.04 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів скла:

$$U_- = 1.48 \text{ В,}$$

$$U_+ = 1.14 \text{ В.}$$

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.3 \text{ В.}$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{калібрувальний} * U_- = 34.2 \text{ пКл,}$$

$$Q_+ = K_{калібрувальний} * U_+ = 18.7 \text{ пКл.}$$

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 25мм скла $C_{об} = 13.2 \text{ пФ}$.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.7.



Рис.4.7. Осцилограма калібрувального імпульсу скла товщиною 2.3мм, діаметром електроду 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} \cdot U_{ген} = 132 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі скла:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 2.15 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{калібрувальний} = \frac{1 \cdot q_0}{U_{сер}} = 61 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка скла товщиною 2.3мм при діаметрі електрода 25 мм представлено на рисунку 4.7.

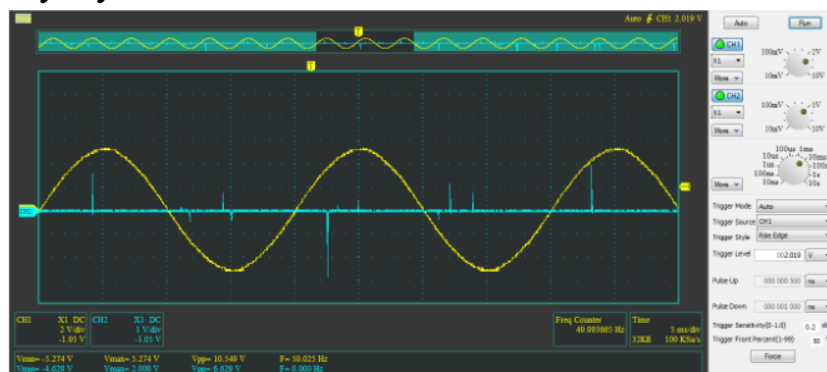


Рис.4.7. Випробування зразка скла товщиною 2.3мм при діаметрі електрода 25 мм

Напруга появи ЧР у зразку скла $U_{чр} = 3.49 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів скла:

$$U_-=3.7 \text{ В,}$$

$$U_+ = 1.8 \text{ В.}$$

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 2.25 \text{ В.}$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 226 \text{ пКл,}$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 114 \text{ пКл.}$$

4.3 Випробування зразка скла товщиною 5.6 мм

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 10мм складала $C_{об}=0.86 \text{ пФ}$.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.8.

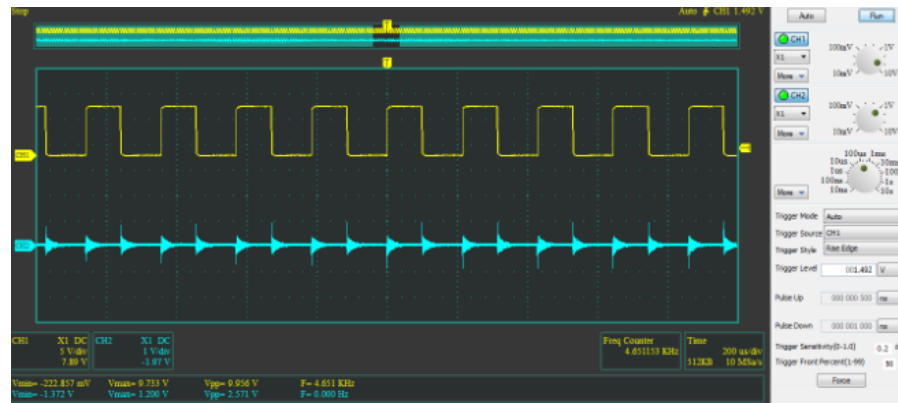


Рис.4.8. Осцилограма калібрувального імпульсу скла товщиною 2.3мм, діаметром електроду 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} * U_{\text{ген}} = 8.6 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі складала:

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.15 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{\text{калібрувальний}} = \frac{1 * q_0}{U_{\text{сер}}} = 7.6 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка скла товщиною 5.6мм при діаметрі електроду 10 мм представлено на рисунку 4.9.

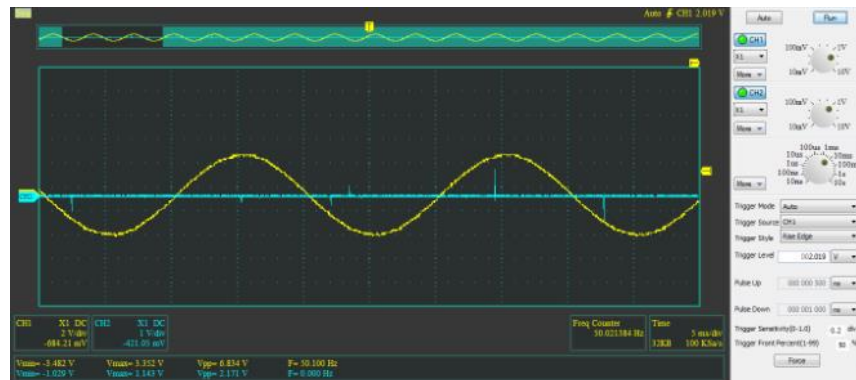


Рис.4.9. Випробування зразка скла товщиною 5.6мм при діаметрі електрода 10 мм

Напруга появи ЧР у зразку скла $U_{\text{чр}} = 5.27$ кВ, (амплітудне значення).
Амплітуда часткових розрядів скла:

$$U_- = 4.5 \text{ В},$$

$$U_+ = 1.37 \text{ В}.$$

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 2.85 \text{ В}.$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 24.3 \text{ пКл},$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 10.4 \text{ пКл}.$$

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 25мм скла $C_{06} = 5.4$ пФ.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.10.

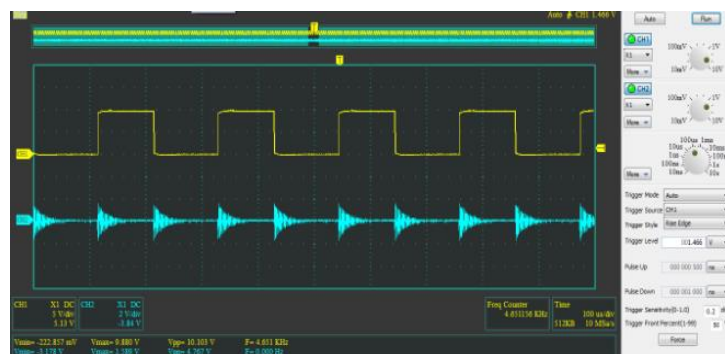


Рис.4.10. Осцилограма калібрувального імпульсу скла товщиною 5.6мм, діаметром електрода 25мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} * U_{ген} = 54 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі склала:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.76 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{калібрувальний} = \frac{1 * q_0}{U_{сер}} = 30.6 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка скла товщиною 5.6мм при діаметрі електрода 25 мм представлено на рисунку 4.11.

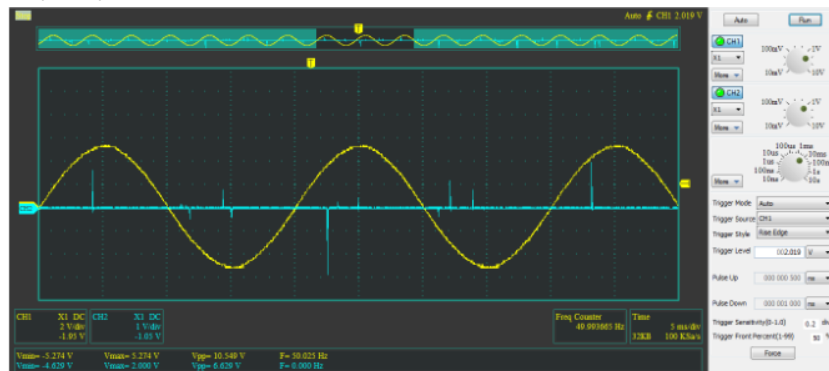


Рис.4.11. Випробування зразка скла товщиною 5.6мм при діаметрі електрода 25 мм

Напруга появи ЧР у зразку скла $U_{чр} = 5.4 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів скла:

$$U_- = 4.6 \text{ В,}$$

$$U_+ = 2 \text{ В.}$$

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 3.3 \text{ В.}$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{калібрувальний} * U_- = 141 \text{ пКл,}$$

$$Q_+ = K_{калібрувальний} * U_+ = 61 \text{ пКл.}$$

4.4 Випробування зразка картону товщиною 0.5 мм

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 10мм складала $C_{06}=5.5$ пФ.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.12.

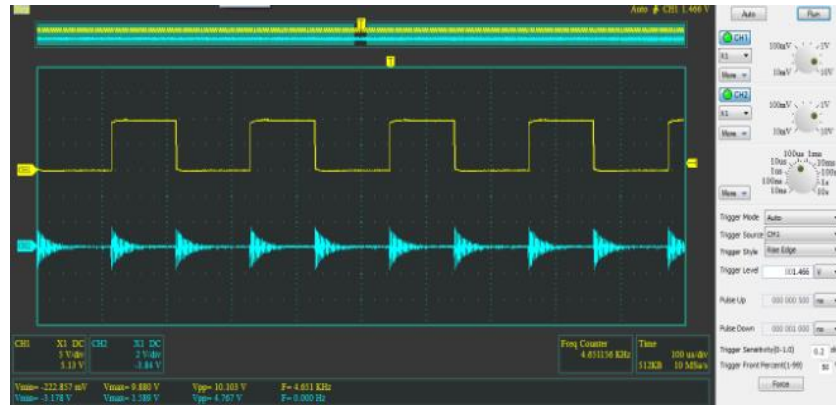


Рис.4.12. Осцилограма калібрувального імпульсу картону товщиною 0.5мм, діаметром електроду 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{06} \cdot U_{\text{ген}} = 55 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі складала:

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.5 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{\text{калібрувальний}} = \frac{1 \cdot q_0}{U_{\text{сер}}} = 36.6 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка картону товщиною 0.5мм при діаметрі електрода 10 мм представлено на рисунку 4.13.

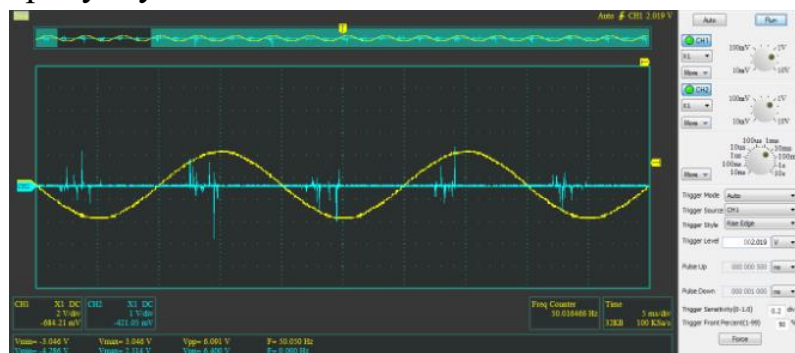


Рис.4.13. Випробування зразка скла товщиною 0.5мм при діаметрі електрода 10 мм

Напруга появи ЧР у зразку склала $U_{\text{чр}} = 2,8 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів складала:

$$U_- = 4.2 \text{ В},$$

$$U_+ = 2.1 \text{ В}.$$

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 3.15 \text{ В}.$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 154 \text{ пКл},$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 77 \text{ пКл}.$$

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 25мм складала $C_{\text{об}} = 34 \text{ пФ}$.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.14.

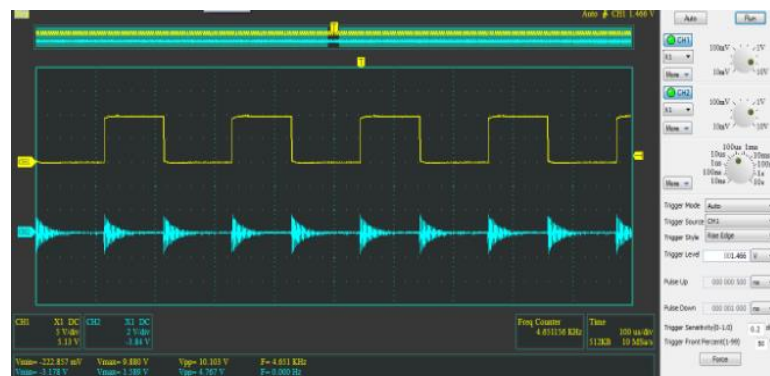


Рис.4.14. Осцилограма калібрувального імпульсу картону товщиною 0.5мм, діаметром електроду 25мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{\text{об}} * U_{\text{ген}} = 340 \text{ пКл}.$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі складала:

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 2.5 \text{ В}.$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{\text{калібрувальний}} = \frac{1 * q_0}{U_{\text{сер}}} = 137.8 \text{ пКл}.$$

Випробування зразка картон товщиною 0.5мм при діаметрі електрода 25 мм представлено на рисунку 4.15.

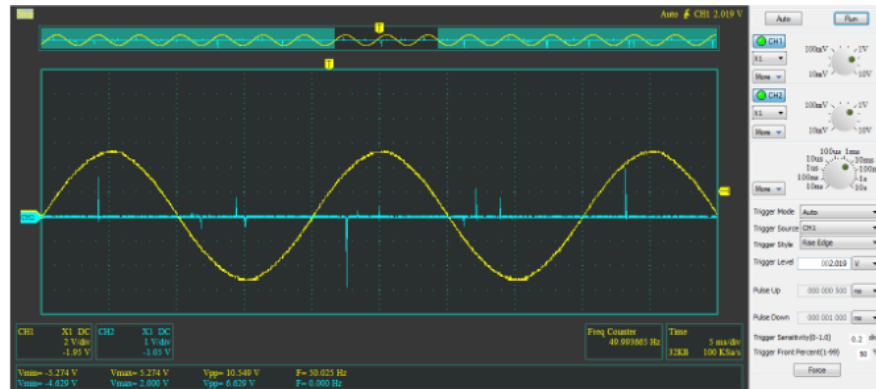


Рис.4.15. Випробування зразка картону товщиною 0.5мм при діаметрі електрода 25 мм

Напруга появи ЧР у зразку складала $U_{\text{чр}} = 2.7$ кВ, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів складала:

$$U_{-}=2.28 \text{ В},$$

$$U_{+}=1.7 \text{ В}.$$

$$U_{\text{сеп}} = \frac{U_{-} + U_{+}}{2} = 2 \text{ В}.$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_{-} = K_{\text{калібрувальний}} * U_{-} = 314 \text{ пКл},$$

$$Q_{+} = K_{\text{калібрувальний}} * U_{+} = 234 \text{ пКл}.$$

4.5 Випробування зразка картону товщиною 1 мм

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 10мм складала $C_{\text{об}}=2.7$ пФ.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.16.

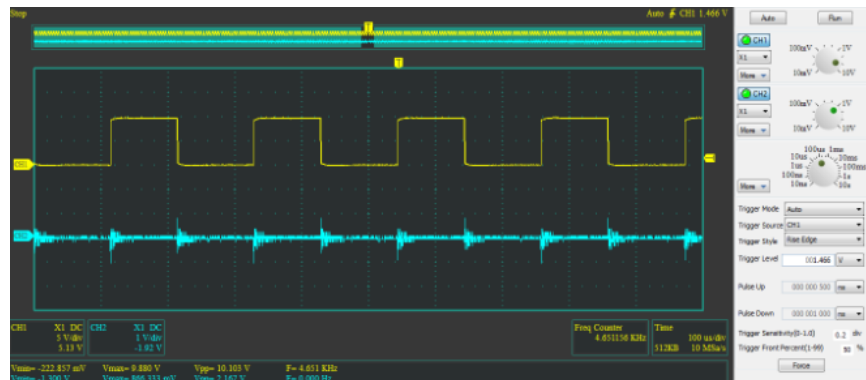


Рис.4.16. Осцилограма калібрувального імпульсу картону товщиною 1мм, діаметром електроду 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} \cdot U_{ген} = 27 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі складала:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.2 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{калібрувальний} = \frac{1 \cdot q_0}{U_{сер}} = 23.1 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка картону товщиною 1мм при діаметрі електроду 10 мм представлено на рисунку 4.17.

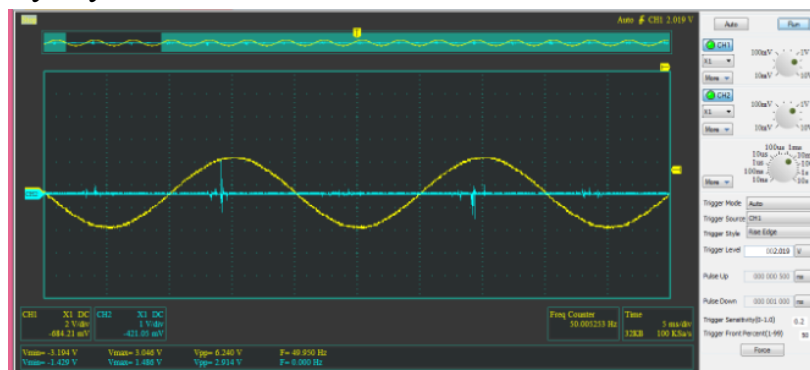


Рис.4.17. Випробування зразка скла товщиною 1мм при діаметрі електроду 10 мм

Напруга появи ЧР у зразку складала $U_{чр} = 3 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів складала:

$$U_- = 1.42 \text{ В,}$$

$$U_+ = 1.48 \text{ В.}$$

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.95 \text{ В.}$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 32.8 \text{ пКл,}$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 34.2 \text{ пКл.}$$

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 25мм складала $C_{об}=17$ пФ.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.18.

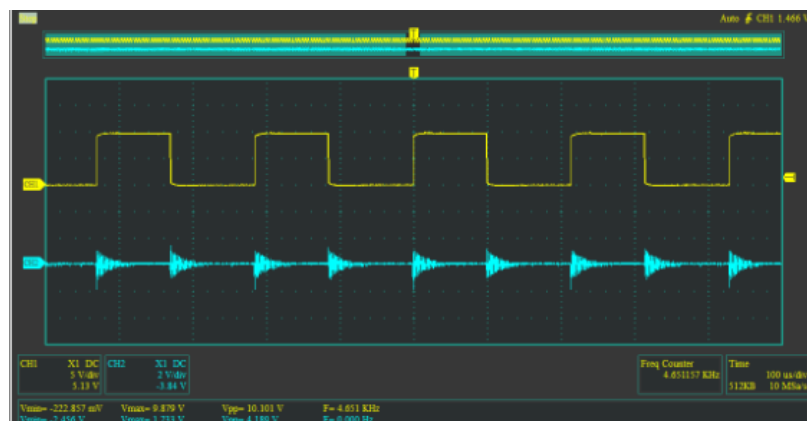


Рис.4.18. Осцилограма калібрувального імпульсу картону товщиною 1мм, діаметром електроду 25мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} * U_{\text{ген}} = 170 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі картон:

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 2.1 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{\text{калібрувальний}} = \frac{1 * q_0}{U_{\text{сер}}} = 83.7 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка картон товщиною 1мм при діаметрі електрода 25 мм представлено на рисунку 4.19.



Рис.4.19. Випробування зразка картону товщиною 1мм при діаметрі електрода 25 мм

Напруга появи ЧР у зразку складала $U_{\text{чр}} = 3$ кВ, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів складала:

$$U_- = 1 \text{ В},$$

$$U_+ = 0.9 \text{ В}.$$

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 0.95 \text{ В}.$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 83.7 \text{ пКл},$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 75.3 \text{ пКл}.$$

4.6 Випробування зразка картону товщиною 2 мм

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 10мм складала $C_{06}=1.3$ пФ.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.20.

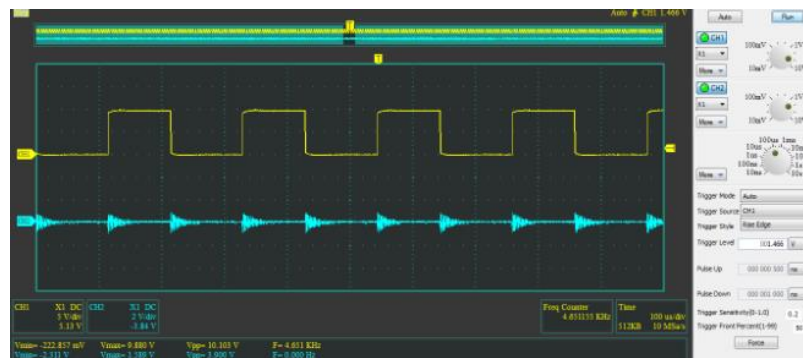


Рис.4.20. Осцилограма калібрувального імпульсу картону товщиною 2мм, діаметром електрода 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} * U_{ген} = 13 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі склала:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 0.97 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{калібрувальний} = \frac{1 * q_0}{U_{сер}} = 13.7 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка картону товщиною 2мм при діаметрі електрода 10 мм представлено на рисунку 4.21.

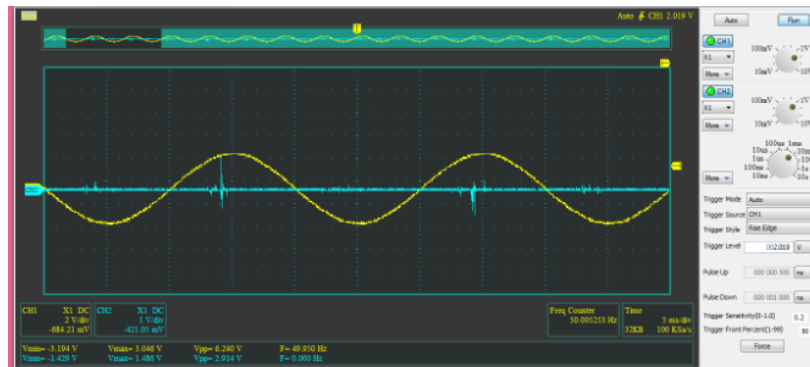


Рис.4.21. Випробування зразка скла товщиною 2мм при діаметрі електрода 10 мм

Напруга появи ЧР у зразку скла $U_{чр} = 3.64 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів скла:

$$U_- = 1.48 \text{ В,}$$

$$U_+ = 1.1 \text{ В.}$$

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.3 \text{ В.}$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{калібрувальний} * U_- = 20.3 \text{ пКл,}$$

$$Q_+ = K_{калібрувальний} * U_+ = 15.1 \text{ пКл.}$$

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 25мм скла $C_{об}=8.6 \text{ пФ}$.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.22.

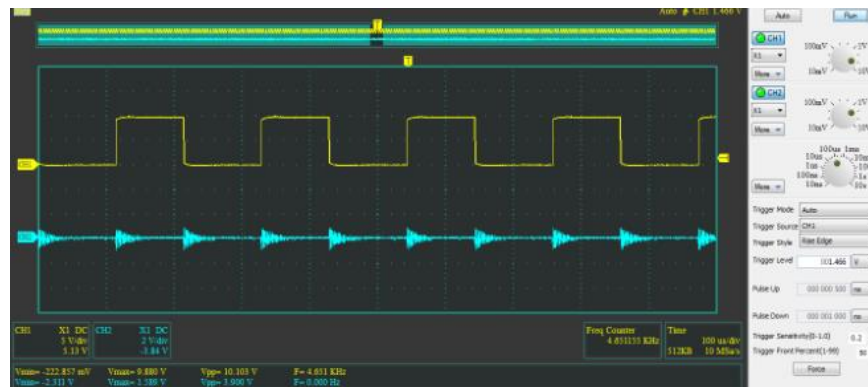


Рис.4.22. Осцилограма калібрувального імпульсу картону товщиною 2мм, діаметром електроду 25мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{об} * U_{ген} = 86 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі картон:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1.97 \text{ В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{калібрувальний} = \frac{1 * q_0}{U_{сер}} = 44.6 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка картон товщиною 2мм при діаметрі електроду 25 мм представлено на рисунку 4.23.

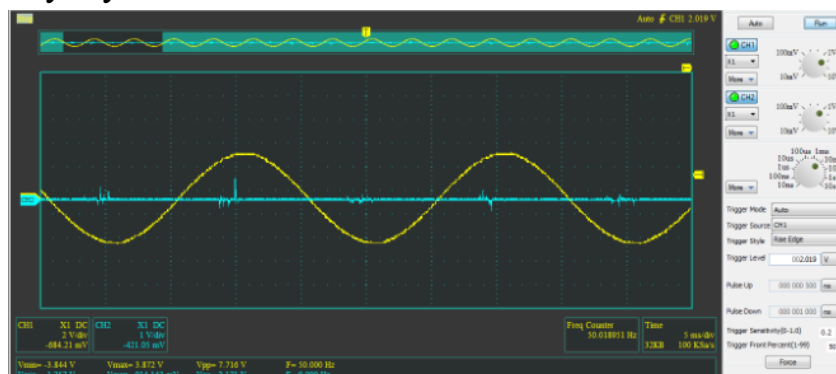


Рис.4.24. Випробування зразка картону товщиною 2мм при діаметрі електроду 25 мм

Напруга появи ЧР у зразку склала $U_{чр} = 3.8 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів складала:

$$U_- = 1.12 \text{ В},$$

$$U_+ = 0.91 \text{ В}.$$

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 1 \text{ В}.$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 49.9 \text{ пКл},$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 40.9 \text{ пКл}.$$

4.7 Випробування зразка оргскло товщиною 5 мм

Ємність вимірювальної комірки з встановленим зразком ізоляції при високовольтному електроді діаметром 10мм складала $C_{\text{об}} = 0.69 \text{ пФ}$.

Осцилограма калібрувального імпульсу представлена на рисунку 4.25.

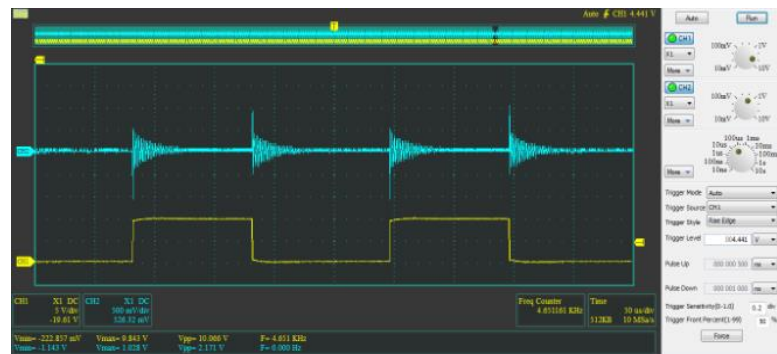


Рис.4.25. Осцилограма калібрувального імпульсу оргскла товщиною 5мм, діаметром електроду 10мм

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{\text{об}} * U_{\text{ген}} = 6.9 \text{ пКл}.$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі складала:

$$U_{\text{сер}} = \frac{U_- + U_+}{2} = 0.91 \text{ В}.$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{\text{калібрувальний}} = \frac{1 * q_0}{U_{\text{сер}}} = 7.79 \text{ пКл}.$$

Калібрувальний заряд склав:

$$q_0 = C_{06} * U_{ген} = 43 \text{ пКл.}$$

Середня напруга імпульсу на вимірювальній осцилограмі картон:

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} 1.1 = \text{В.}$$

Калібрувальний коефіцієнт склав:

$$K_{\text{калібрувальний}} = \frac{1 * q_0}{U_{сер}} = 39.2 \text{ пКл.}$$

Випробування зразка картон товщиною 2мм при діаметрі електрода 25 мм представлено на рисунку 4.28.

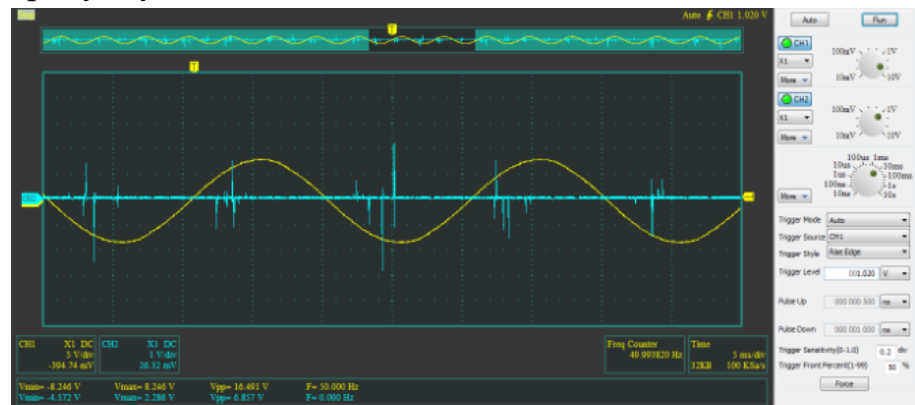


Рис.4.28. Випробування зразка картону товщиною 5мм при діаметрі електрода 25 мм

Напруга появи ЧР у зразку складала $U_{чр} = 8.6 \text{ кВ}$, (амплітудне значення).

Амплітуда часткових розрядів складала:

$$U_- = 4.76 \text{ В,}$$

$$U_+ = 2.28 \text{ В.}$$

$$U_{сер} = \frac{U_- + U_+}{2} = 3,51 \text{ В.}$$

що еквівалентно величині уявного заряду:

$$Q_- = K_{\text{калібрувальний}} * U_- = 187 \text{ пКл,}$$

$$Q_+ = K_{\text{калібрувальний}} * U_+ = 89.5 \text{ пКл.}$$

4.8 Аналіз результатів

Розрахунок напруженостей електричного поля в зразках ізоляційних матеріалів виконувалась за формулами 6[1] та представлені у таблиці 4.1 та 4.2.

Матеріал	Діелектрична проникність	Товщина мм	Діаметр електрода 10 мм		Градуювальний коеф. пКл на 1 В зареєстрованого ЧР	Напруга виникнення ЧР кВ	Уявний заряд Q ₁				Напруженість кВ/мм ф.6	
							U+, В	U-, В	Q+, пКл	Q-, пКл		
			Площа мм ²	Ємність пФ							E _{сер}	E _{макс}
Оргскло	5	5	78,5	0.69	7,79	7,5		4,76		37	1,61	3,581
Картон	4	0.5		5.5	36.6	3	2.1	4.2	77	154	5,7	7,182
-	-	1		2.7	23.1	3	1.42	1.48	34.2	32.8	3	4,327
-	-	2		1.3	13.7	3.64	0.86	1.15	15.1	20.3	1,86	3,181
Скло	7	1.2		4	25.3	2.15	1.7	3.3	43	83.5	1,979	2,976
-	-	2.3		2.1	16.4	3.04	1.14	1.48	18.7	34.2	1,42	2,521
-	-	5.6		0.86	7.6	5.27	1.37	4.5	10.4	24.3	0,941	2,166

Таблиця 4.1. Вихідні данні розрахунку для діаметру електрода 10мм (див. додаток 1)

Матеріал	Діелектрична проникність	Товщина мм	Діаметр електрода 25 мм		Градуювальний коеф. пКл на 1 В зареєстрованого ЧР	Напруга виникнення ЧР кВ	Уявний заряд Q_2				Максимальна напруженість E_{\max} кВ/мм	$Q_{1\text{серед}}/Q_{2\text{серед}}$
			Площа мм ²	Ємність пФ			U+, В	U-, В	Q+, пКл	Q-, пКл		
Оргскло	5	5	490	4,3	39.2	8.6	2.28	4.76	89.5	187		
Картон	4	0.5		34	137.8	2.7	1.7	2.28	234	314		274/115=2,38
-	-	1		17	83.7	3	0.9	1	75.3	83.7		79/33=2,39
-	-	2		8.6	44.6	3.8	0.91	1.12	40.9	49.9		41/17=2,35
Скло	7	1.2		25.3	95.2	2.6	2.2	4.7	217	453		335/63=5,3
-	-	2.3		13.2	61	3.49	1.88	3.77	114	226		170/26=6,5
-	-	5.6		5.4	30.6	5.4	2	4.6	61	141		101/17=5,94

Таблиця 4.2. Вихідні данні розрахунку для діаметру електрода 25мм (див. додаток 1)

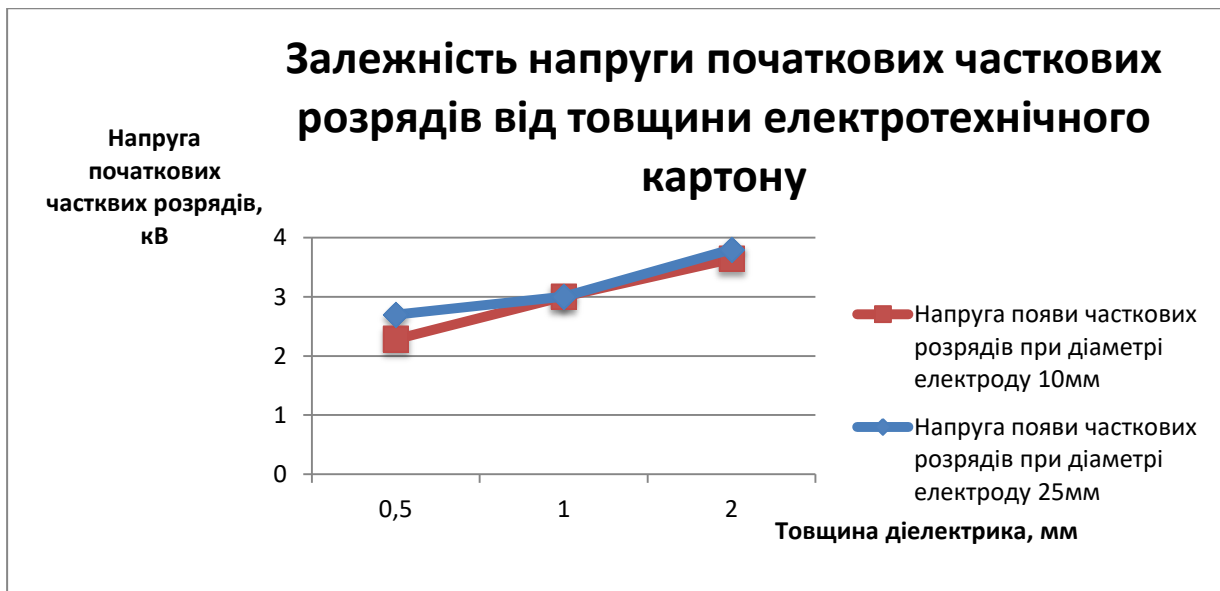


Рис.4.29. Залежність напруги початкових часткових розрядів від товщини електротехнічного картону

Можна зробити висновки, що ЧР не залежать від діаметру електроду, виникають практично при однаковій напрузі. Розбіжність не значна, що входить в межі похибки вимірюваної прикладної напруги.

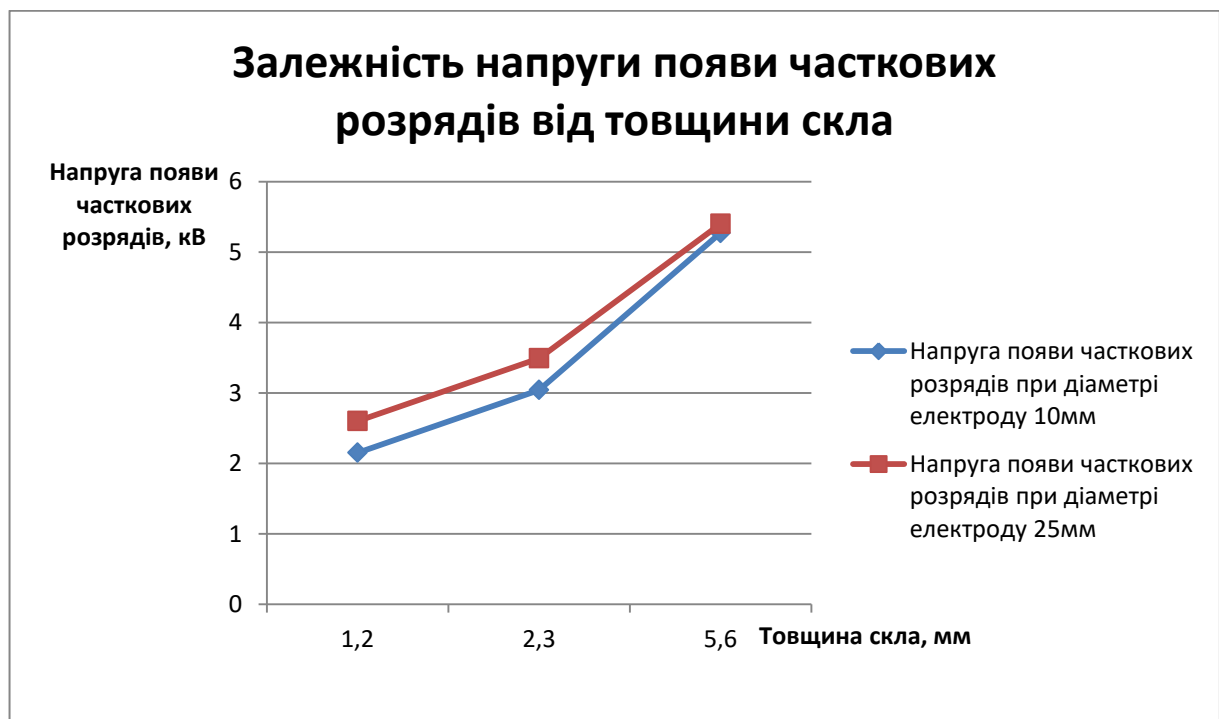


Рис.4.29. Залежність напруги початкових часткових розрядів від товщини скла

Як і для картону розбіжність входить у межі похибки.

Інтенсивність уявного заряду для різних умов експериментів наведені на рис.4.30

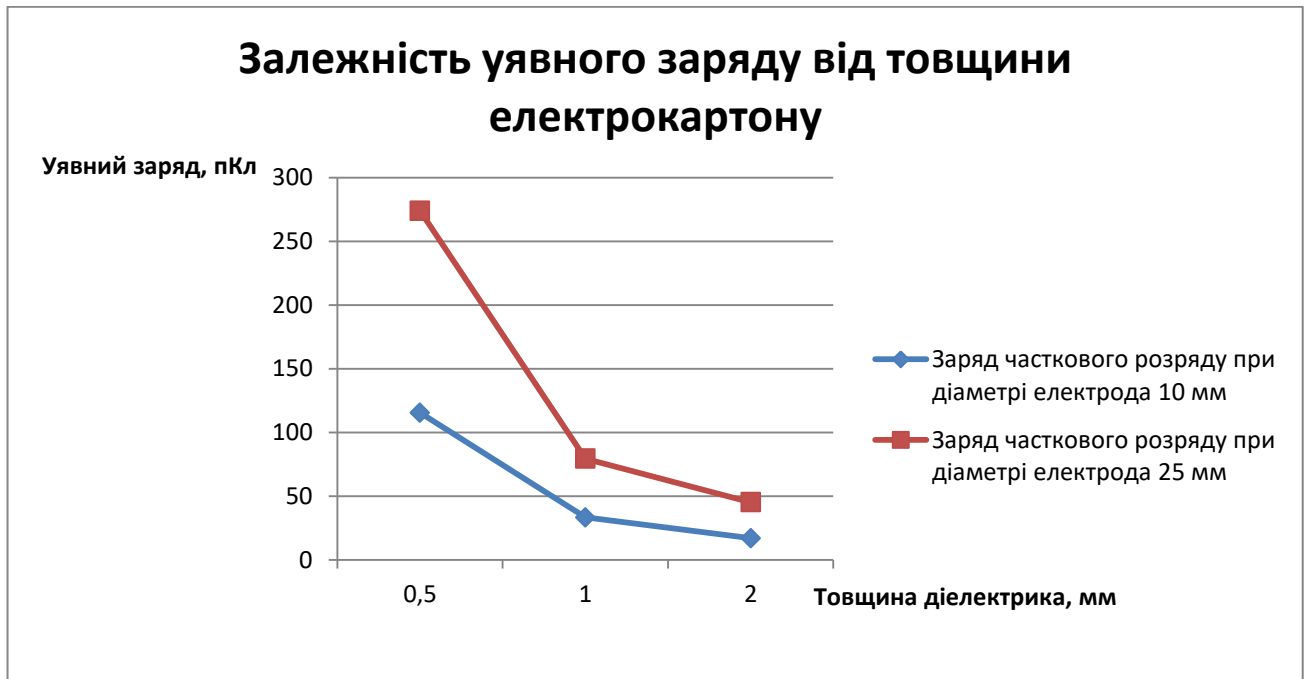


Рис.4.30. Залежність уявного заряду від товщини електрокартону

Відношення між величинами уявного заряду при застосуванні електродів діаметру 10 та 25мм складає 2,35 рази.

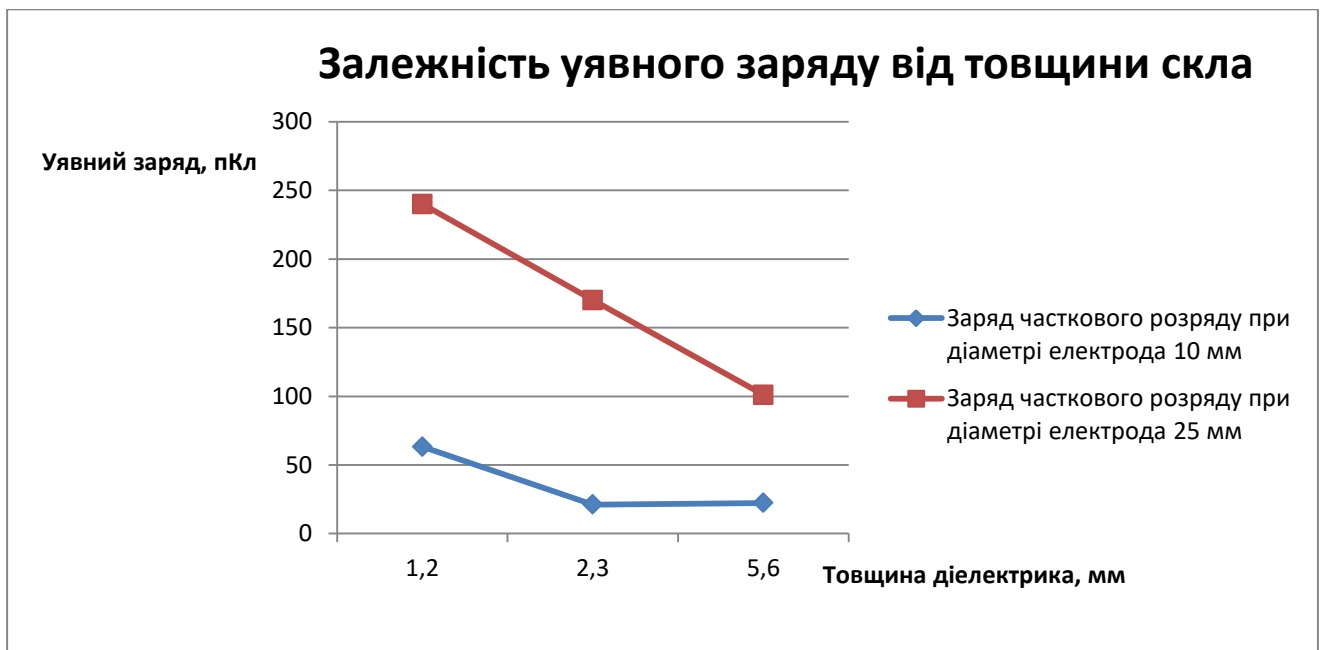


Рис.4.31. Залежність уявного заряду від товщини скла

Відношення між величинами уявного заряду при застосуванні електродів діаметру 10 та 25мм складає 6 разів.

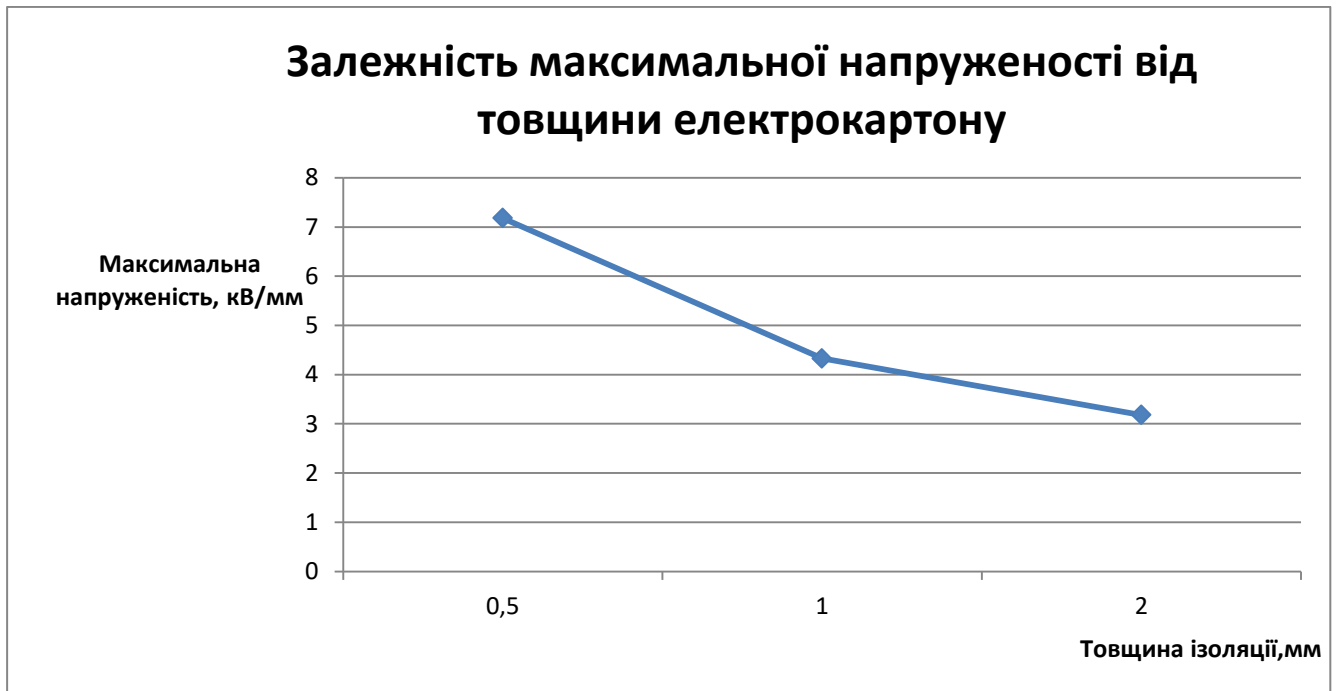


Рис.4.32. Залежність максимальної напруженості від товщини електрокартону

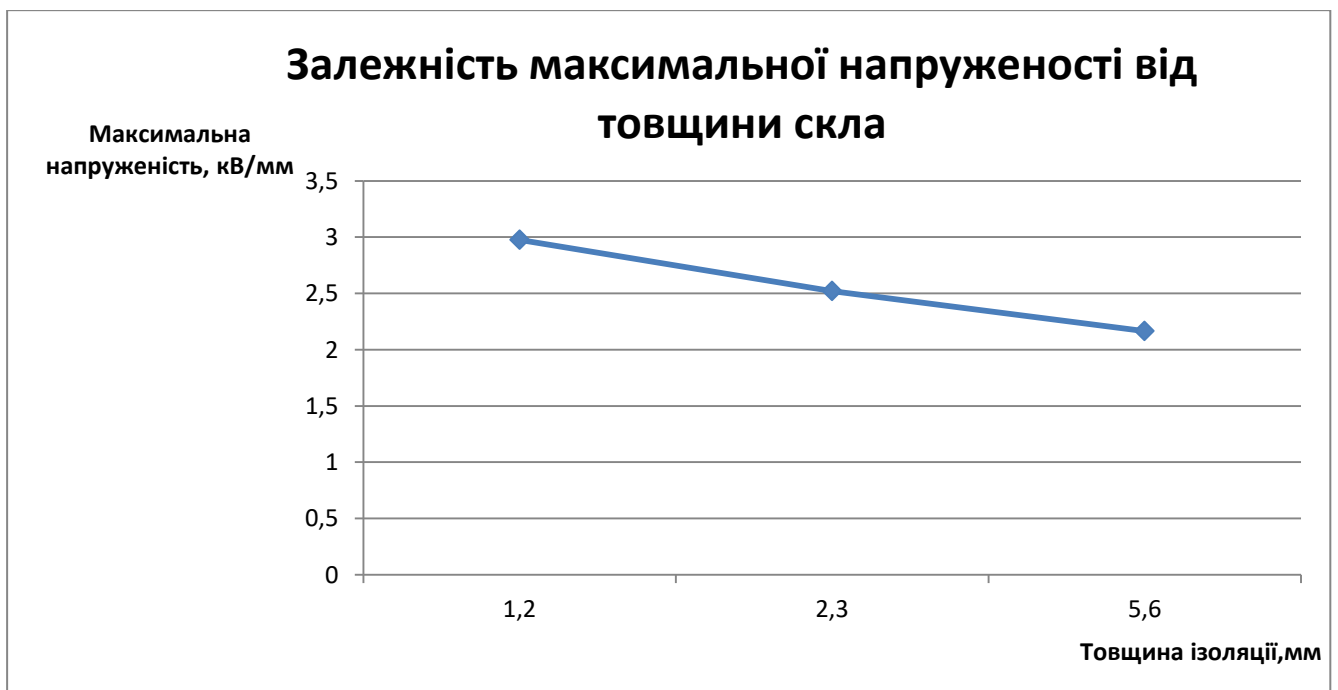


Рис.4.33. Залежність максимальної напруженості від товщини скла

Висновки до розділу

Калібрування проводилось за допомогою генератора точних імпульсів Г5-75 за параметрів (Т-20мкс, .D – 0.1мкс, t-10мкс, К-1, U – 9.999В) та цифрового осцилографа INSTRUSTAR. Об'єктами вимірювань були такі ізоляційні матеріали: скло, оргскло, картон.

Можна представити, що ЧР виникає по периметру високовольтного електроду, довжина якого становить при діаметру 10мм:

$$l = \pi * d = 3.14 * 10 = 31.4 \text{ мм}$$

За аналогічною формулою для діаметру 25 мм периметр буде складати 78.5 мм, що більше у 2,5 рази (78.5/31.4).

Аналізуючи зростання величини уявного заряду для картону із зростанням діаметром електроду можемо зробити висновок, що зростання відбувається пропорційно, приблизно у 2.3 – 2.4 рази (див. табл.4.2).

Однак для скла такої залежності не спостерігається. Зростання інтенсивності уявного заряду при збільшенні діаметру електроду склали приблизно у 6 разів (див. табл.4.2). Це може бути пояснено із збільшенням товщини зразка діелектрика приблизно в 2.5-3 рази та впливу на викривлення електричного поля. Для підтвердження цієї гіпотези необхідно провести розрахунок розподілу електричного поля шляхом моделювання у відомих програмних продуктах, наприклад, COMSOL, FEMM або їм подібним.

При аналізі напруги виникнення початкових ЧР для електрокартону необхідно відмітити, що в незалежності від діаметру електродів, напруги виникнення ЧР приблизно однакові для однакових зразків. Спостерігається залежність тільки від товщиною зразка. Розрахунок напруженості електричного поля підтверджує ці результати, оскільки в обох випадках ці напруженості однакові для однієї і тієї ж товщини зразка.

Аналогічні результати отримані також і для зразків зі скла - напруги виникнення початкових ЧР залежать тільки від товщини зразка і не залежать від діаметру електроду. Таким чином отримані залежності початку виникнення ЧР для картону та скла в показали залежність ЧР від їх товщини. Визначальним при

цьому є напруженість електричного поля, яка виникає на краю електроду, який знаходиться під потенціалом. Досліди показали, що із зменшенням діелектричної проникності матеріалу напруженість виникнення початкових ЧР буде зростати. Прямопропорційної залежності, однак, в отриманих результатах не спостерігається. Фактична залежність може бути встановлені тільки після розрахунку розподілу електричних полів у між електродному проміжку з урахуванням діелектричної проникності матеріалу зразків. Крім того при розрахунках сама діелектрична проникність не вимірювалась а визначалась з довідкової літератури та бралось якесь усереднене значення. Особливо це стосується скла, діелектрична проникність якого, відповідно до довідників, може варіюватись від 3,8 до 19[23]!

5. Стартуп проект

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартуп проекту. Можливості його ринкового впровадження та реалізації.

5.1 Опис ідеї проекту

Впровадити експериментальні розрахунки, основним елементом якого є **уточнення виникнення часткових розрядів для високовольтного обладнання**, що дасть змогу збільшити надійність роботи дорогому високовольтному обладнанню.

Опис ідеї стартуп-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Експериментальні розрахунки	Лінії електропередач, високовольтне обладнання	Підвищення надійності, прогнозування термін дії

Таблиця 5.1

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей;
- визначення попереднього кола конкурентів
- проводиться порівняльний аналіз показників для власної ідеї. Визначаються показники: а) гірші значення (W); б) аналогічні (N) значення; в) кращі значення (S) (табл. 5.2).

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	ЛИК	ТрансЕнерго			
1.	Собівартість	низька	висока	середня			Найнижча собівартість серед конкурентів
2.	Продажна вартість	низька	середня	середня			Найвища продажна вартість
3.	Надійність	надійний	надійний	надійний		Є надійним	

4.	Обслуговування	простий	простий	простий		Простий в обслуговуванні	
----	----------------	---------	---------	---------	--	--------------------------	--

Таблиця 5.2

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Впровадження експериментальних розрахунків для виготовлення скляного ізолятора	Розгортання виготовлення здійснюється на фірмі “СпектрумСистемз ”	Доступні всі технології, необхідні для виготовлення.	Автор проекту (розробник) веде безпосередній контроль процесу виготовлення, надаючи документацію та необхідні консультації

Таблиця 5.3

За результатами аналізу таблиці робиться висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску проекту

Визначення ринкових можливостей та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, що дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням ринкового середовища, потреб клієнтів.

Проведений аналіз попиту представлений (табл. 5.4).

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Проводиться 1 раз на три роки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10 %

Таблиця 5.4

Середня норма рентабельності проекту менша за середній банківський відсоток на вкладення. Звідси слідує, що ринок є не привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів (табл. 5.5).

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Захист обладнання	<ul style="list-style-type: none"> - Виробники ізоляторів - Виробника трансформаторів 	<ul style="list-style-type: none"> - Відмінність обладнання вимірювання 	Відповідність характеристикам, що зазначені у сертифікаті

Таблиця 5.5

Далі, аналіз ринкового середовища, що складаються з таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту і що перешкоджає (табл. № 5.6-7).

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Неусвідомленість споживачів	Ризики споживача	Відвідини конференцій, проведення публічних експериментів
2	Збільшення конкурентів	Зменшення долі ринку	Вдосконалення та модернізація,

Таблиця 5.6

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
	Збільшення попиту, поява нових клієнтів	Збільшення надійності ізоляції	Гарантійне обслуговування, пропозиції щодо інших товарів.

Таблиця 5.7

Загальні риси конкуренції на ринку описані (табл. 5.8).

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/чиста	олігополія	-
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/..	національний	Реклама в соціальних мережах
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	внутрішньогалузева	-
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	-	-
5. За характером конкурентних переваг - Цінова / нецінова	-	-
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	марочна	-

Детальний аналіз умов конкуренції (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 5.9).

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Скляні ізолятори виробляють багато фірм	Фірми що мають сучасні лабораторії для досліджень	Не впливають	Не впливають	Існують
<u>Висновки</u> :	Є конкуренти, але більш дорогі	Можливості виходу на ринок є, конкуренти є	Ні	Клієнтам потрібна зменшена ціна та підвищена якість	Обмеження відсутні

На основі аналізу конкуренції, визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 5.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Надійність	Надійність підвищена
2	Вартість	Зменшена вартість за для конкуренції
3	Собівартість	Собівартість є нижчою

Таблиця 5.10

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін проекту (табл. 5.11).

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	19			+				
2	Вартість	20	+						
3	Собівартість	20	+						

Таблиця 5.11

Кінцевим етапом ринкового аналізу впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 5.12) на основі (табл. 5.11).

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: собівартість, вартість, надійність	Слабкі сторони: велика конкуренція
Можливості: збільшення надійності	Загрози: неусвідомленість споживачів

Таблиця 5.12

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Розробка	100 %	1 міс.
2	Виготовлення	100 %	1 день.
3	Випробування	100 %	1 день.

4	Сертифікація	100 %	1 міс.
5	Вихід на ринок	100 %	1 рік.

Таблиця 5.13

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії, передбачає визначення охоплення ринку, опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14).

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Виробники високовольтної техніки	так	15%	є	важко
2	Виробники ЛЕП	так	25%	є	важко
Які цільові групи обрано: всі 2 цільові групи є потенційними клієнтами					

Таблиця 5.14

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 5.15).

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Стратегія лідерства по витратам	Стратегія диференційованого маркетингу	Надійність, вартість	Стратегія лідерства по витратам

Таблиця 5.15

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ n/n	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Ні	Шукати нових та збирати старих	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 5.16

Наступним кроком розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.17), що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Забезпечення відповідності метрологічних характеристик згідно сертифікату	Стратегія лідерства по витратам	Збільшення надійності	Низька собівартість, надійність

Таблиця 5.17

Результатом виконання підрозділу, визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару. У табл. 5.18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
----------	---------	----------------------------	--

	Необхідність збільшення надійності	Забезпечує цю можливість	Можливість збільшити надійність при меншій вартості.
--	------------------------------------	--------------------------	--

Таблиця 5.18

Розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Збільшити надійність ізоляторів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Якість: повинен відповідати всім електротехнічним стандартам, що стосуються скляних ізоляторів		
	Пакування: картон із захисним наповненням.		
	Марка: ОЛТЕСТ+ПВ 45, OLTEST+НС 45		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: демонстрація роботи		
	Після продажу: навчання споживачів, сервісне обслуговування		

Таблиця 5.19

Визначення цінових меж, важливий аспект, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар, що передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути. (табл. 5.20).

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	10 \$	11\$	50000\$	7-8\$

Таблиця 5.20

Визначення оптимальної системи збуту (табл. 5.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників;
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Зв'язок через сайт, зустріч на виставках, соціальні мережі.	Постачальником виступає сама фірма	Ринок СНГ	Грузові перевезення

Таблиця 5.21

Кінцевим оглядом є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування (табл. 5.22).

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Недостатньо інформований споживач, неусвідомлений	Сайт, електрона пошта, конференції, виставки	Збільшення надійності ізоляції	Донесення можливостей та переваг товару до клієнта	Захист – понад усе!

Таблиця 5.22

Висновки по розділу

Даний проект можна реалізувати на фірмі “СпектрумСистемз”, яка розробляє ізоляцію.

Динаміка ринку на збільшення надійності та зменшення витрат на виробництво зростає, як в Україні так і за кордоном, тому проект є рентабельним.

Серед обраних потенційних клієнтів фірми, що виготовляють трансформатори напруги; ЛЕП і все що пов’язано із ізоляцією.

Ключовими перевагами товару є надійність, вартість.

Цільова аудиторія нашої продукції є люди із обмеженими фінансовими можливостями, що згодні співпрацювати із компанією яка нещодавно вийшла на ринок.

Імплементація проекту є ризикованою

Висновки

У роботі було розглянуто важливе на сьогоднішній день питання розвитку часткових розрядів в високовольтній ізоляції. Особливий акцент був присвячений особливостям розвитку ЧР у ізоляції: конденсаторів, кабелів, трансформаторів та електричних машинах. Також не мало важливим пунктом є схеми та методи вимірювання цих розрядів.

У процесі визначення та калібрування експериментальних даних була розроблена установка. Вона допомогла дізнатись напругу виявлення часткових розрядів, напругу калібрування, визначити уявний заряд часткових розрядів. Розраховані фільтри низьких та високих частот які були встановлені у вимірювальну схему.

Була використана калібрувальна методика для малих ємностей випробувального зразка, що дала змогу визначити співвідношення між уявним зарядом та сигналом, який реєструється осцилографом з меншою похибкою.

Аналізуючи розрахунки величини уявного заряду для картону необхідно зазначити, що із зростанням діаметра електроду зростання уявного заряду відбувається пропорційно зростанню його периметру, приблизно у 2.3 – 2.4 рази.

Однак для скла такої залежності не спостерігається. Зростання інтенсивності уявного заряду при збільшенні діаметру електроду склали приблизно у 6 разів. Це може бути пояснено впливом викривлення електричного поля у зв'язку зі збільшенням товщини зразків скла по відношенню до товщини зразків електрокартону. У середньому таке збільшення складає 2,5-3 рази. Для підтвердження цієї гіпотези необхідно провести розрахунок розподілу електричного поля шляхом моделювання у відомих програмних продуктах, наприклад, COMSOL, FEMM або їм подібним.

При аналізі напруги виникнення початкових ЧР для електрокартону необхідно відмітити, що в незалежності від діаметру електродів, напруги виникнення ЧР приблизно однакові для однакових зразків. Спостерігається залежність тільки від товщиною зразка. Аналітичний розрахунок напруженості електричного поля підтверджує ці результати, оскільки в обох випадках ці

напруженості однакові для однієї і тієї ж товщини зразка. Аналогічні результати отримані також і для зразків зі скла - напруги виникнення початкових ЧР залежать тільки від товщини зразка і не залежать від діаметру електроду.

Таким чином отримані залежності початку виникнення ЧР для картону та скла показали залежність ЧР від їх товщини. Визначальним при цьому є напруженість електричного поля, яка виникає на краю електроду, який знаходиться під потенціалом. Досліди показали, що із зменшенням діелектричної проникності матеріалу напруженість виникнення початкових ЧР буде зростати. Прямопропорційної залежності, однак, в отриманих результатах не спостерігається. Фактична залежність може бути встановлені тільки після розрахунку розподілу електричних полів у міжелектродному проміжку з урахуванням діелектричної проникності матеріалу зразків. У роботі при розрахунках діелектрична проникність матеріалів зразків не вимірювалась а визначалась з довідкової літератури та використовувалось якісь усереднені значення. Особливо це стосується скла, діелектрична проникність якого, відповідно до довідників, може варіюватись від 3,8 до 19!

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні ізоляції різноманітного обладнання високої напруги. Знання закономірностей виникнення ЧР дає змогу оптимізувати вибір товщини діелектричних матеріалів запобігаючи виникненню ЧР при експлуатації обладнання та забезпечить більший ресурс безаварійної роботи його ізоляції.

Список використаної літератури

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях – Л.Энергия.Ленингр.отд.,1979.-224с.
2. Проценко О.Р.к.т.н.,доц.,Троценко к.т.н.,доц. Клименко О.С., студент. Визначення чутливої ємності стенду для вимірювання часткових розрядів в зразках ізоляції малої ємності. НТУУ «КПІ» листопад 2019.
3. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. - ГОСТ Р 55191-2012.
4. IEC 60270:2000 “High-voltage test techniques partial discharge measurements”
5. Русов В.А. Измерение частичних розрядов в изоляции высоковольтного оборудования. УрГУПС 620034, г. Екатеринбург, 2011.
6. <https://coil32.ru/calc/ferrite-rod.html>
7. Калашніков А.Ю., Перетворення сигналів: навч. Посіб. Для бакалаврів./ Калашніков А.Ю., Шкуліпа А.В., Горелік С.М. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. – Ч. 1 і 2. – 100 с
8. Электрообладания та электроустановки. Метод вимірювання характеристик часткових розрядів. - ГОСТ 20074 - 83.
9. «Измерения частотных разрядов в изоляции оборудования» // Электричні станції. – 1984
- 10.<http://um.co.ua/8/8-4/8-47333.html>
- 11.Международный стандарт МЭК 60270, перевод Федоренко Т.А. «Методы высоковольтных испытаний, измерение частичных разрядов».
- 12.Трансформатори силові. Вимірювання часткових розрядів під час випробувань напругою промислової частоти. «Измерения частотных разрядов в изоляции оборудования» // Электричні станції. – 1984
- 13.Poittevin J.. Andre P. «New digital partial discharge measurements on transformer» // CIGRE. rep. N Paris, 1986.
- 14.Влови́ко ВП ЧР в диагностике изоляции – Новосибирск:Наука,2007.-155с.
- 15.Сви П.М. Измерение частичных разрядов в изоляции оборудования высокого напряжения энергосистем. Изд. «Энергия», г.Москва, 1977.
- 16.Маяков В.П., Соколов В.В. Методы диагностики состояния трансформаторного оборудования // Выпуск 11. – СПб: ПЭИПК, 2000. С. 13 – 23.
- 17.Вдови́ко В.П. Образование и развитие частичных разрядов в бумажно – масляной изоляции высоковольтного оборудования в условиях эксплуатации. - СибНИИЭ (г. Новосибирск). 2004 г.- 40 с.
- 18.Андреев А.М., Монастырский А.Е., Соловьев Ю.В., Таджибаев А.И. Частичные разряды и методы их измерения; под ред. А.И. Таджибаева. – СПб: ПЭИПК, 2010. – 48 с.

- 19.Гурин В.В., Каплан Д.А. Измерение частичных разрядов при испытаниях силовых трансформаторов 110кВ // Электротехника – 1973.
- 20.Иерусалимов М.Е., Ильенко О.С., Виноградный А.Н. Оценка соотношения между кажущимся и фактическим зарядами частичных разрядов. // Энергетика – 1982.
- 21.Голенко О.В., Живодерников С.В., Овсянников А.Г. Опыт регистрации частичных разрядов с помощью цифрового осциллографа // Энергетик – 2001.
- 22.<https://www.astena.ru/g5-75.html>
- 23.<https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnethism/DEPLiquids/Di electricConstanVarious/>

Додатки

Додаток 1

Розрахунок ємностей об'єктів

$$\epsilon_{\text{скло}} := 7$$

$$\epsilon_{\text{картон}} := 4$$

$$\epsilon_{\text{оргскло}} := 5$$

$$U_{\text{генератора}} := 10 \text{ В}$$

$$\epsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

$$d_{\text{електрода1}} := 10 \text{ мм}$$

$$d_{\text{електрода2}} := 25 \text{ мм}$$

$$S_{\text{електрода1}} := 3.14 \cdot \left(\frac{d_{\text{електрода1}}}{2} \right)^2 = 78.5 \text{ мм}^2$$

$$S_{\text{електрода2}} := 3.14 \cdot \left(\frac{d_{\text{електрода2}}}{2} \right)^2 = 490 \text{ мм}^2$$

$$d_{1\text{скло}} := 2.3 \text{ мм}$$

$$d_{2\text{скло}} := 5.6 \text{ мм}$$

$$d_{3\text{скло}} := 1.2 \text{ мм}$$

$$d_{1\text{картон}} := 0.5 \text{ мм}$$

$$d_{2\text{картон}} := 1 \text{ мм}$$

$$d_{3\text{картон}} := 2 \text{ мм}$$

$$d_{1\text{оргскло}} := 5 \text{ мм}$$

$$C_{11\text{скло}} := \frac{\epsilon_{\text{скло}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода}} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{d_{1\text{скло}} \cdot 10^{-3}} = 2.114 \times 10^{-12}$$

$$C_{12\text{скло}} := \frac{\epsilon_{\text{скло}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода}} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{d_{1\text{скло}} \cdot 10^{-3}} = 1.321 \times 10^{-11}$$

$$C_{22\text{скло}} := \frac{\epsilon_{\text{скло}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода2}} \cdot 10^{-6}}{d_{2\text{скло}} \cdot 10^{-3}} = 5.428 \times 10^{-12}$$

$$C_{11\text{картон}} := \frac{\epsilon_{\text{картон}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода1}} \cdot 10^{-6}}{d_{1\text{картон}} \cdot 10^{-3}} = 5.558 \times 10^{-12}$$

$$C_{12\text{картон}} := \frac{\epsilon_{\text{картон}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода2}} \cdot 10^{-6}}{d_{1\text{картон}} \cdot 10^{-3}} = 3.474 \times 10^{-11}$$

$$C_{21\text{картон}} := \frac{\epsilon_{\text{картон}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода1}} \cdot 10^{-6}}{d_{2\text{картон}} \cdot 10^{-3}} = 2.779 \times 10^{-12}$$

$$C_{22\text{картон}} := \frac{\epsilon_{\text{картон}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода2}} \cdot 10^{-6}}{d_{2\text{картон}} \cdot 10^{-3}} = 1.737 \times 10^{-11}$$

$$C_{31\text{картон}} := \frac{\epsilon_{\text{картон}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода1}} \cdot 10^{-6}}{d_{3\text{картон}} \cdot 10^{-3}} = 1.389 \times 10^{-12}$$

$$C_{32\text{картон}} := \frac{\epsilon_{\text{картон}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода2}} \cdot 10^{-6}}{d_{3\text{картон}} \cdot 10^{-3}} = 8.684 \times 10^{-12}$$

$$C_{11\text{оргскло}} := \frac{\epsilon_{\text{оргскло}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода1}} \cdot 10^{-6}}{d_{1\text{оргскло}} \cdot 10^{-3}} = 6.947 \times 10^{-13}$$

$$C_{12\text{оргскло}} := \frac{\epsilon_{\text{оргскло}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода2}} \cdot 10^{-6}}{d_{1\text{оргскло}} \cdot 10^{-3}} = 4.342 \times 10^{-12}$$

$$C_{31\text{скло}} := \frac{\epsilon_{\text{скло}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода1}} \cdot 10^{-6}}{d_{3\text{скло}} \cdot 10^{-3}} = 4.053 \times 10^{-12}$$

$$C_{32\text{скло}} := \frac{\epsilon_{\text{скло}} \cdot \epsilon_0 \cdot S_{\text{электрода2}} \cdot 10^{-6}}{d_{3\text{скло}} \cdot 10^{-3}} = 2.533 \times 10^{-11}$$

Напруга виникнення часткових розрядів у різних ізоляційних матеріалах

Матеріал: оргскло, діаметр електроду 10мм, товщина діелектрика 5мм.

$$U_{\text{в.ч.р.оргскло.10мм}} := 7.5 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Відємна полярність

$$U_{\text{вп.мінус.оргскло.10мм}} := 4.76 \text{ В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.оргскло.10мм}} := 0.937 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.оргскло.10мм}} := 0.891 \text{ В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.оргскло.10мм}} := \frac{U_{\text{кал.плюс.оргскло.10мм}} + U_{\text{кал.мінус.оргскло.10мм}}}{2} = 0.891 \text{ В}$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{оргскло.10мм}} := C_{11.\text{оргскло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 6.947 \times 10^{-12} \text{ Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.оргскло.10мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{оргскло.10мм}}}{U_{\text{середнє.оргскло.10мм}}} = 7.797 \times 10^{-12} \text{ Кл}$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.оргскло.10мм}} := U_{\text{вп.мінус.оргскло.10мм}} \cdot K_{\text{калібровки.оргскло.10мм}} = 3.711 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Матеріал: оргскло, діаметр електроду 25мм, товщина діелектрика 5мм.

$$U_{\text{в.ч.р.оргскло.25мм}} := 2.5 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.оргскло.25мм}} := 4.76 \text{ В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.оргскло.25мм}} := 2.28 \text{ В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.оргскло.25мм}} := 1.3 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.оргскло.25мм}} := 0.91 \quad \text{В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.оргскло.25мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.оргскло.25мм}} + U_{\text{кал.плюс.оргскло.25мм}}}{2} = 1.105 \quad \text{В}$$

Розрахунок заряду

$$Q_{0.\text{оргскло.25мм}} := C_{12.\text{оргскло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 4.342 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.оргскло.25мм}} := \frac{1 \cdot Q_{0.\text{оргскло.25мм}}}{U_{\text{середнє.оргскло.25мм}}} = 3.929 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.оргскло.25мм}} := U_{\text{вп.мінус.оргскло.25мм}} \cdot K_{\text{калібровки.оргскло.25мм}} = 1.87 \times 10^{-10} \quad \text{Кл}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.оргскло.25мм}} := U_{\text{вп.плюс.оргскло.25мм}} \cdot K_{\text{калібровки.оргскло.25мм}} = 8.959 \times 10^{-11}$$

Матеріал: скло, діаметр електроду 10мм, товщина діелектрика 1.2мм.

$$U_{\text{в.чр.скло.д10мм.т1.2мм}} := 2.15 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.скло.д10мм.т1.2мм}} := 3.3 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.скло.д10мм.т1.2мм}} := 1.7 \quad \text{В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.скло.д10мм.т1.2мм}} := 1.72 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.скло.д10мм.т1.2мм}} := 1.48 \quad \text{В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.скло.д10мм.т1.2мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.скло.д10мм.т1.2мм}} + U_{\text{кал.плюс.скло.д10мм.т1.2мм}}}{2} = 1.6$$

Розрахунок заряду

$$Q_{0.\text{скло.д10мм.т1.2мм}} := C_{31.\text{скло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 4.053 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т1.2мм}} := \frac{1 \cdot Q_{0.\text{скло.д10мм.т1.2мм}}}{U_{\text{середнє.скло.д10мм.т1.2мм}}} = 2.533 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Заряд часткового розряду +

$$Q_{\text{чр.мінус.скло.д10мм.т1.2мм}} := U_{\text{вп.мінус.скло.д10мм.т1.2мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т1.2мм}} = 8.358 \times 10^{-11}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.скло.д10мм.т1.2мм}} := U_{\text{вп.плюс.скло.д10мм.т1.2мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т1.2мм}} = 4.306 \times 10^{-11}$$

Матеріал: скло, діаметр електроду 25мм, товщина діелектрика 1.2мм.

$$U_{\text{в.ч.р.скло.д25мм.т1.2мм}} := 2.6 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.скло.д25мм.т1.2мм}} := 4.76 \text{ В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.скло.д25мм.т1.2мм}} := 2.28 \text{ В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.скло.д25мм.т1.2мм}} := 3.3 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.скло.д25мм.т1.2мм}} := 2.02 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.скло.д25мм.т1.2мм}} := 2.02 \text{ В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.скло.д25мм.т1.2мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.скло.д25мм.т1.2мм}} + U_{\text{кал.плюс.скло.д25мм.т1.2мм}}}{2} = 2.66$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{скло.д25мм.т1.2мм}} := C_{32\text{скло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 2.533 \times 10^{-10} \text{ Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.скло.д25мм.т1.2мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{скло.д25мм.т1.2мм}}}{U_{\text{середнє.скло.д25мм.т1.2мм}}} = 9.522 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.скло.д25мм.т1.2мм}} := U_{\text{вп.мінус.скло.д25мм.т1.2мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д25мм.т1.2мм}} = 4.532 \times 10^{-10}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.скло.д25мм.т1.2мм}} := U_{\text{вп.плюс.скло.д25мм.т1.2мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д25мм.т1.2мм}} = 2.171 \times 10^{-10}$$

Матеріал: скло, діаметр електроду 10мм, товщина діелектрика 2.3мм.

$$U_{\text{в.ч.р.скло.д10мм.т2.3мм}} := 3.04 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.скло.д10мм.т2.3мм}} := 1.48 \text{ В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.скло.д10мм.т2.3мм}} := 1.14 \text{ В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.скло.д10мм.т2.3мм}} := 1.37 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.скло.д10мм.т2.3мм}} := 1.2 \text{ В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.скло.д10мм.т2.3мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.скло.д10мм.т2.3мм}} + U_{\text{кал.плюс.скло.д10мм.т2.3мм}}}{2} = 1.285$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{скло.д10мм.т2.3мм}} := C_{11\text{скло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 2.114 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т2.3мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{скло.д10мм.т2.3мм}}}{U_{\text{середнє.скло.д10мм.т2.3мм}}} = 1.645 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Заряд часткового розряду

$$Q_{\text{чр.мінус.скло.д10мм.т2.3мм}} := U_{\text{вп.мінус.скло.д10мм.т2.3мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т2.3мм}} = 2.435 \times 10^{-11}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.скло.д10мм.т2.3мм}} := U_{\text{вп.плюс.скло.д10мм.т2.3мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т2.3мм}} = 1.876 \times 10^{-11}$$

Матеріал: скло, діаметр електроду 25мм, товщина діелектрика 2.3мм.

$$U_{\text{в.ч.р.скло.д25мм.т2.3мм}} := 3.49 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.скло.д25мм.т2.3мм}} := 3.71 \text{ В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.скло.д25мм.т2.3мм}} := 1.88 \text{ В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.скло.д25мм.т2.3мм}} := 2.6 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.скло.д25мм.т2.3мм}} := 1.73 \text{ В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.скло.д25мм.т2.3мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.скло.д25мм.т2.3мм}} + U_{\text{кал.плюс.скло.д25мм.т2.3мм}}}{2} = 2.165$$

Розрахунок заряду

$$q_{0,\text{скло.д25мм.т2.3мм}} := C_{12\text{скло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 1.321 \times 10^{-10} \quad \text{Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.скло.д25мм.т2.3мм}} := \frac{1 \cdot q_{0,\text{скло.д25мм.т2.3мм}}}{U_{\text{середнє.скло.д25мм.т2.3мм}}} = 6.104 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.скло.д25мм.т2.3мм}} := U_{\text{вп.мінус.скло.д25мм.т2.3мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д25мм.т2.3мм}} = 2.265 \times 10^{-10}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.скло.д25мм.т2.3мм}} := U_{\text{вп.плюс.скло.д25мм.т2.3мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д25мм.т2.3мм}} = 1.148 \times 10^{-10}$$

Матеріал: скло, діаметр електроду 10мм, товщина діелектрика 5.6мм.

$$U_{\text{в.ч.р.скло.д10мм.т5.6мм}} := 5.27 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.скло.д10мм.т5.6мм}} := 4.5 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.скло.д10мм.т5.6мм}} := 1.37 \quad \text{В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.скло.д10мм.т5.6мм}} := 1.2 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.скло.д10мм.т5.6мм}} := 1.08 \quad \text{В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.скло.д10мм.т5.6мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.скло.д10мм.т5.6мм}} + U_{\text{кал.плюс.скло.д10мм.т5.6мм}}}{2} = 1.14$$

Розрахунок заряду

$$q_{0,\text{скло.д10мм.т5.6мм}} := C_{21\text{скло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 8.684 \times 10^{-12} \quad \text{Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т5.6мм}} := \frac{1 \cdot q_{0,\text{скло.д10мм.т5.6мм}}}{U_{\text{середнє.скло.д10мм.т5.6мм}}} = 7.618 \times 10^{-12} \quad \text{Кл}$$

Заряд часткового розряду

$$Q_{\text{чр.мінус.скло.д10мм.т5.6мм}} := U_{\text{вп.мінус.скло.д10мм.т5.6мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т5.6мм}} = 3.428 \times 10^{-11}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.скло.д10мм.т5.6мм}} := U_{\text{вп.плюс.скло.д10мм.т5.6мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло.д10мм.т5.6мм}} = 1.044 \times 10^{-11}$$

Матеріал: скло, діаметр електроду 25мм, товщина діелектрика 5.6мм.

+

$$U_{\text{в.ч.р.скло,д25мм,т5.6мм}} := 5.27 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.скло,д25мм,т5.6мм}} := 4.6 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.скло,д25мм,т5.6мм}} := 2 \quad \text{В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.скло,д25мм,т5.6мм}} := 2.1 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.скло,д25мм,т5.6мм}} := 1.44 \quad \text{В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.скло,д25мм,т5.6мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.скло,д25мм,т5.6мм}} + U_{\text{кал.плюс.скло,д25мм,т5.6мм}}}{2} = 1.77$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{скло,д25мм,т5.6мм}} := C_{22\text{скло}} \cdot U_{\text{генератора}} = 5.428 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.скло,д25мм,т5.6мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{скло,д25мм,т5.6мм}}}{U_{\text{середнє.скло,д25мм,т5.6мм}}} = 3.066 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Заряд часткового розряду

$$Q_{\text{чр.мінус.скло,д25мм,т5.6мм}} := U_{\text{вп.мінус.скло,д25мм,т5.6мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло,д25мм,т5.6мм}} = 1.411 \times 10^{-10}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.скло,д25мм,т5.6мм}} := U_{\text{вп.плюс.скло,д25мм,т5.6мм}} \cdot K_{\text{калібровки.скло,д25мм,т5.6мм}} = 6.133 \times 10^{-11}$$

Матеріал: картон, діаметр електроду 10мм, товщина діелектрика 0.5мм.

$$U_{\text{в.ч.р.картон.д10мм.т0.5мм}} := 3 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.картон.д10мм.т0.5мм}} := 4.2 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.картон.д10мм.т0.5мм}} := 2.1 \quad \text{В}$$

----- Напруга калібровки -----

$$U_{\text{кал.мінус.картон.д10мм.т0.5мм}} := 1.73 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.картон.д10мм.т0.5мм}} := 1.3 \quad \text{В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.картон.д10мм.т0.5мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.картон.д10мм.т0.5мм}} + U_{\text{кал.плюс.картон.д10мм.т0.5мм}}}{2} = 1.515$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{картон.д10мм.т0.5мм}} := C_{11\text{картон}} \cdot U_{\text{генератора}} = 5.558 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.картон.д10мм.т0.5мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{картон.д10мм.т0.5мм}}}{U_{\text{середнє.картон.д10мм.т0.5мм}}} = 3.669 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Заряд часткового розряду +

$$Q_{\text{чр.мінус.картон.д10мм.т0.5мм}} := U_{\text{вп.мінус.картон.д10мм.т0.5мм}} \cdot K_{\text{калібровки.картон.д10мм.т0.5мм}} = 1.541 \times 10^{-10} \quad \text{Кл}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.картон.д10мм.т0.5мм}} := U_{\text{вп.плюс.картон.д10мм.т0.5мм}} \cdot K_{\text{калібровки.картон.д10мм.т0.5мм}} = 7.704 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

Матеріал: картон, діаметр електроду 25мм, товщина діелектрика 0.5мм.

$$U_{\text{в.ч.р.картон.д25мм.т0.5мм}} := 2.7 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.картон.д25мм.т0.5мм}} := 2.28 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.картон.д25мм.т0.5мм}} := 1.7 \quad \text{В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.картон.д25мм.т0.5мм}} := 3.17 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.картон.д25мм.т0.5мм}} := 1.87 \quad \text{В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.картон.д25мм.т0.5мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.картон.д25мм.т0.5мм}} + U_{\text{кал.плюс.картон.д25мм.т0.5мм}}}{2} = 2.52$$

Розрахунок заряду

$$Q_{0.\text{картон.д25мм.т0.5мм}} := C_{12\text{картон}} \cdot U_{\text{генератора}} = 3.474 \times 10^{-10} \text{ Кл}$$

Коефіцієнт калибровки на вольт:

$$K_{\text{калибровки.картон.д25мм.т0.5мм}} := \frac{1 \cdot Q_{0.\text{картон.д25мм.т0.5мм}}}{U_{\text{середнє.картон.д25мм.т0.5мм}}} = 1.378 \times 10^{-10} \text{ Кл}$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.картон.д25мм.т0.5мм}} := U_{\text{вп.мінус.картон.д25мм.т0.5мм}} \cdot K_{\text{калибровки.картон.д25мм.т0.5мм}} = 3.143 \times 10^{-10} \text{ Кл}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.картон.д25мм.т0.5мм}} := U_{\text{вп.плюс.картон.д25мм.т0.5мм}} \cdot K_{\text{калибровки.картон.д25мм.т0.5мм}} = 2.343 \times 10^{-10} \text{ Кл}$$

Матеріал: картон, діаметр електроду 10мм, товщина діелектрика 1мм.

$$U_{\text{в.ч.р.картон.д10мм.т1мм}} := 3 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.картон.д10мм.т1мм}} := 1.42 \text{ В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.картон.д10мм.т1мм}} := 1.48 \text{ В}$$

Напруга калибровки

$$U_{\text{кал.мінус.картон.д10мм.т1мм}} := 1.26 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.картон.д10мм.т1мм}} := 1.14 \text{ В}$$

Середнє значення напруги калибровки:

$$U_{\text{середнє.картон.д10мм.т1мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.картон.д10мм.т1мм}} + U_{\text{кал.плюс.картон.д10мм.т1мм}}}{2} = 1.2$$

Розрахунок заряду

$$Q_{0.\text{картон.д10мм.т1мм}} := C_{21\text{картон}} \cdot U_{\text{генератора}} = 2.779 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Коефіцієнт калибровки на вольт:

$$K_{\text{калибровки.картон.д10мм.т1мм}} := \frac{1 \cdot Q_{0.\text{картон.д10мм.т1мм}}}{U_{\text{середнє.картон.д10мм.т1мм}}} = 2.316 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.картон.д10мм.т1мм}} := U_{\text{вп.мінус.картон.д10мм.т1мм}} \cdot K_{\text{калибровки.картон.д10мм.т1мм}} = 3.288 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.картон.д10мм.т1мм}} := U_{\text{вп.плюс.картон.д10мм.т1мм}} \cdot K_{\text{калибровки.картон.д10мм.т1мм}} = 3.427 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Матеріал: картон, діаметр електроду 25мм, товщина діелектрика 1мм.

$$U_{\text{в.ч.р.картон.д25мм.т1мм}} := 3 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.картон.д25мм.т1мм}} := 1 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.картон.д25мм.т1мм}} := 0.9 \quad \text{В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.картон.д25мм.т1мм}} := 2.45 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.картон.д25мм.т1мм}} := 1.7 \quad \text{В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.картон.д25мм.т1мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.картон.д25мм.т1мм}} + U_{\text{кал.плюс.картон.д25мм.т1мм}}}{2} = 2.075$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{картон.д25мм.т1мм}} := C_{22\text{картон}} \cdot U_{\text{генератора}} = 1.737 \times 10^{-10} \quad \text{Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.картон.д25мм.т1мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{картон.д25мм.т1мм}}}{U_{\text{середнє.картон.д25мм.т1мм}}} = 8.37 \times 10^{-11} \quad \text{Кл}$$

$$K_{\text{калібровки.картон.д25мм.т1мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{картон.д25мм.т1мм}}}{U_{\text{середнє.картон.д25мм.т1мм}}} = 8.37 \times 10^{-11} \quad \text{Кл} \quad +$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.картон.д25мм.т1мм}} := U_{\text{вп.мінус.картон.д25мм.т1мм}} \cdot K_{\text{калібровки.картон.д25мм.т1мм}} = 8.37 \times 10^{-11}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.картон.д25мм.т1мм}} := U_{\text{вп.плюс.картон.д25мм.т1мм}} \cdot K_{\text{калібровки.картон.д25мм.т1мм}} = 7.533 \times 10^{-11}$$

Матеріал: картон, діаметр електроду 10мм, товщина діелектрика 2мм.

$$U_{\text{в.ч.р.картон.д10мм.т2мм}} := 3.64 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.картон.д10мм.т2мм}} := 1.48 \quad \text{В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.картон.д10мм.т2мм}} := 1.1 \quad \text{В}$$

Напруга калібровки

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.картон.д10мм.т2мм}} := 1.156 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.картон.д10мм.т2мм}} := 0.866 \text{ В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.картон.д10мм.т2мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.картон.д10мм.т2мм}} + U_{\text{кал.плюс.картон.д10мм.т2мм}}}{2} = 1.011$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{картон.д10мм.т2мм}} := C_{31\text{картон}} \cdot U_{\text{генератора}} = 1.389 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Коефіцієнт калібровки на вольт:

$$K_{\text{калібровки.картон.д10мм.т2мм}} := \frac{1 \cdot q_{0.\text{картон.д10мм.т2мм}}}{U_{\text{середнє.картон.д10мм.т2мм}}} = 1.374 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$

Заряд часткового заряду

$$Q_{\text{чр.мінус.картон.д10мм.т2мм}} := U_{\text{вп.мінус.картон.д10мм.т2мм}} \cdot K_{\text{калібровки.картон.д10мм.т2мм}} = 2.034 \times 10^{-11}$$

$$Q_{\text{чр.плюс.картон.д10мм.т2мм}} := U_{\text{вп.плюс.картон.д10мм.т2мм}} \cdot K_{\text{калібровки.картон.д10мм.т2мм}} = 1.512 \times 10^{-11}$$

Матеріал: картон, діаметр електроду 25мм, товщина діелектрика 2мм.

$$U_{\text{в.ч.р.картон.д25мм.т2мм}} := 3.8 \cdot 10^3$$

Полярність

$$U_{\text{вп.мінус.картон.д25мм.т2мм}} := 1.12 \text{ В}$$

$$U_{\text{вп.плюс.картон.д25мм.т2мм}} := 0.9149 \text{ В}$$

Напруга калібровки

$$U_{\text{кал.мінус.картон.д25мм.т2мм}} := 2.311 \text{ В}$$

$$U_{\text{кал.плюс.картон.д25мм.т2мм}} := 1.58 \text{ В}$$

Середнє значення напруги калібровки:

$$U_{\text{середнє.картон.д25мм.т2мм}} := \frac{U_{\text{кал.мінус.картон.д25мм.т2мм}} + U_{\text{кал.плюс.картон.д25мм.т2мм}}}{2} = 1.946$$

Розрахунок заряду

$$q_{0.\text{картон.д25мм.т2мм}} := C_{32\text{картон}} \cdot U_{\text{генератора}} = 8.684 \times 10^{-11} \text{ Кл}$$